



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA
Y DE FLUIDOS

TRABAJO FIN DE GRADO

FORMACIÓN DE AGLOMERADOS EN
COMBUSTORES DE LECHO
FLUIDIZADO

Autor: Leonel Ortega Moncayo

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Tutor: Jesús Gómez Hernández

Fecha: 15/06/2015

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	5
1.1 MOTIVACIÓN	6
1.2 OBJETIVOS	6
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	6
CAPÍTULO 2: LECHOS FLUIDOS	8
2.1. HISTORIA	8
2.2. DEFINICIÓN DE FLUIDIZACIÓN	9
2.3. COMPORTAMIENTO DE UN LECHO FLUIDO	12
2.4. CALIDAD DE FLUIDIZACIÓN	13
2.5. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS	14
2.5.1 Propiedades de las partículas	14
2.5.2 Clasificación de las partículas de fluidización	15
2.6. BURBUJAS EN EL LECHO FLUIDO	18
2.6.1 Formación y crecimiento de burbujas	19
2.7 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA FLUIDIZACIÓN	20
2.7.1 Operaciones físicas	20
2.7.1.1 Intercambio de calor	20
2.7.1.2 Recubrimiento de metales	20
2.7.1.3 Adsorción	21
2.7.1.4 Secado de sólidos	21
2.7.2 Reacciones de síntesis	22
2.7.3 Craqueo de hidrocarburos	22
2.7.3.1 Craqueo catalítico fluido	23
2.7.3.2 Craqueo térmico	23
2.7.4 Combustión e incineración	23
2.7.4.1 Combustión de carbón	23
2.7.4.2 Incineración de residuos sólidos	23
2.7.5 Gasificación	24
2.7.5.1 Gasificación de carbón	24
2.7.5.2 Gasificación de residuos sólidos urbanos	25
2.7.6 Activación del Carbón	25
2.7.7 Calcinación	26
2.7.8 Reacciones con sólidos	26
2.7.9 Biofluidización	27
2.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS LECHOS FLUIDOS	27
2.8.1 Ventajas	27
2.8.2 Desventajas	28
CAPÍTULO 3: MÉTODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN	29



3.1 PÉRDIDAS DE CARGA EN EL LECHO	29
3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN	31
3.2.1 Fluctuaciones de presión.....	31
3.2.1.1 Teorema de Nyquist.....	33
3.2.2 Desviación típica	34
3.2.3 Determinación de la velocidad mínima de fluidización.....	35
3.3 FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO	38
3.4 ESPECTROGRAMAS.....	39
3.4.1 El espectro de frecuencias.....	39
CAPÍTULO 4: INSTALACIÓN	41
4.1 EL LECHO	43
4.2 FLUIDO DE TRABAJO Y PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	44
4.2.1 Características del fluido de trabajo.....	44
4.2.2 Características de las partículas	44
4.3 EQUIPO DE MEDIDA Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	44
4.3.1 Sondas de presión	45
4.3.2 Transductores de presión	45
4.3.3 Sensores de temperatura y humedad relativa EE33-MFTJ	47
4.3.4 Tarjeta de adquisición de datos	50
4.3.4.1 Bastidor NI-cDAQ-9172	50
4.3.4.2 Tarjeta de adquisición de datos NI-9233	52
4.3.4.3 Tarjeta de adquisición de datos NI-9205	53
4.3.5 Fuente de alimentación.....	54
4.3.6 Bomba de engranajes Masterflex.....	55
CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	60
CAPÍTULO 6: MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS SEÑALES	63
CAPÍTULO 7: RESULTADOS.....	69
7.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN	69
7.2 CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE CONTROL.....	73
7.3 ENSAYOS DE AGLOMERACIÓN	76
7.3.1 Análisis de las señales de presión, humedad y temperatura.	76
7.3.2 Cantidad de agua secada.....	85
7.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS.....	91
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA	96



RESUMEN

El presente proyecto busca estudiar la formación de aglomerados en combustores de lechos fluidizados, para ello es necesario reproducir el comportamiento de dichos aglomerados, así que se ha decidido hacer esto mediante la inyección de agua en el seno del lecho.

Se ha creído conveniente hacer esta reproducción mediante la inyección de agua, ya que en otras investigaciones se ha determinado que las señales y los resultados que arrojan este tipo de ensayos son muy similares pero menos costosos y más fáciles de realizar, que si las reproducciones experimentales se hicieran con otros métodos.

Primero que nada, es necesario determinar un estado inicial, para ello se hace una caracterización del comportamiento de un lecho fluidizado en seco. Posteriormente se procede a inyectar agua en el interior del lecho, con la peculiaridad de que en los diferentes ensayos que se van a realizar se introducen diferentes volúmenes de agua con distintos tiempos de inyección. Esto se hace para simular varios escenarios con el objetivo de ver si el lecho presenta un comportamiento característico en cada escenario o por el contrario, ver si tiene un comportamiento general, independientemente del volumen o del tiempo de inyección. Para este estudio se ha decidido analizar tanto las señales de presión como las señales de temperatura y humedad relativa mediante el programa informático de MATLAB.

ABSTRACT

This project aims to study the formation of agglomerates in fluidized bed combustors. It is necessary to reproduce the behavior of such agglomerates, so it has been decided to do this by injecting water within the bed.

It has been deemed as useful to do this by injecting water, because other studies has determined that the signals and results that such tests produce are very similar but less expensive and easier to perform than with other methods.

First of all, it is necessary to determine an initial state so that a characterization of the behavior of a dry, fluidized bed can be done. Subsequently water is injected into the bed, with the peculiarity that in various tests different volumes of water are introduced with different injection times. This is done to simulate various scenarios in order to see if the bed has a characteristic behavior at each stage or, on the contrary, to see if there is a general behavior, regardless of volume or duration of injection. For this study it was decided to analyze the pressure signals as well as the signals of temperature and relative humidity using MATLAB software.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Se sabe que alrededor de 1940 se comenzó a realizar varios estudios y aplicaciones sobre el fenómeno de fluidización de partículas sólidas, dicho fenómeno consiste básicamente en que un lecho de partículas sólidas se mantiene suspendido por una corriente de gas o líquido que pasa a través de ellas bajo ciertas condiciones de presión, temperatura y algunos otros parámetros. El nombre de este fenómeno se debe a que existen ciertas similitudes con el comportamiento de un fluido y de ahí que se le haya denominado como “lecho fluidizado o lecho fluido”.

Los lechos fluidos presentan propiedades y ventajas muy buenas en una gran variedad de aplicaciones industriales y esa es la razón por la que se han realizado una infinidad de estudios y técnicas de caracterización para poder conocer y predecir lo que ocurre en el interior de un lecho. Hay que decir que todos estos estudios realizados hasta el día de hoy no siempre han sido fáciles de realizar y sobre todo no siempre sus resultados han sido fiables, por lo que la mayoría de estos estudios se han hecho en instalaciones de pequeña escala con el fin de mantener un mayor control sobre los posibles inconvenientes que pueden aparecer durante el trabajo con un lecho fluido. Es por ello que ha resultado muy complicado y se ha requerido de mucho tiempo para poder desarrollar aplicaciones de este fenómeno en instalaciones de gran tamaño. Para llevar a cabo la caracterización de cómo se comporta un lecho fluido se han desarrollado varios métodos basados en:

- Las fluctuaciones de presión medidas durante el proceso de fluidización.
- La velocidad de ascenso de las burbujas.
- La pérdida de carga en la base del lecho.

En la actualidad existen otros métodos más sofisticados para realizar la caracterización de un lecho fluido que requieren de elementos como rayos laser, sensores ópticos o tomografías.

De los métodos expuestos anteriormente para efectuar la caracterización de un lecho fluido el más fácil de implementar es el método de la pérdida de carga y esto se debe a su relativa simplicidad en la ejecución práctica y la fiabilidad de sus resultados. Este método, en ciertas ocasiones puede ser poco útil ya que existe la necesidad de tomar medidas tanto en los estados de lecho fijo como de lecho variable, por lo que es obligatorio detener la fluidización.

El método de las fluctuaciones de presión se empezó a utilizar posteriormente al de la pérdida de carga y también es muy utilizado por su sencilla implementación en aplicaciones industriales y porque no hace falta detener las operaciones para definir la velocidad mínima de fluidización.

El método basado en el cálculo de la fracción de volumen es mucho menos utilizado pese a que los resultados que arroja son de gran precisión y esto se debe a que su implementación en las aplicaciones industriales es bastante complicada, ya que requiere de tecnología más sofisticada que requiere de tomografías de capacitancia



eléctrica.

1.1 MOTIVACIÓN

La aplicación de la fluidización de partículas en procesos industriales ha ido creciendo a lo largo del tiempo, hasta el punto que hoy en día existe la imperiosa necesidad de investigar y desarrollar más esta tecnología ya que hay muchísimas aplicaciones industriales que se encuentran limitadas porque no se conoce en detalle la dinámica de los lechos fluidos.

Este trabajo se enfoca en la simulación de la formación de aglomerados en combustores de lecho fluido, para lo cuál se inyecta agua en el interior de un lecho variando el volumen y el caudal de inyección, con la finalidad de conocer y poder predecir o al menos reducir la formación de estos aglomerados con la finalidad de que no interrumpan el correcto funcionamiento de un lecho fluidizado.

1.2 OBJETIVOS

- Estudiar de forma experimental cómo la inyección de agua afecta la formación de aglomerados en el interior de combustores de un lecho fluidizado.
- Caracterizar el comportamiento de un lecho fluido para definir un estado de referencia o de control para los posteriores análisis y resultados.
- Determinar el comportamiento del lecho cuando el distribuidor de aire no gira, cuando gira a 50 rev/min, o cuando gira a 100 rev/min.
- Analizar la señal de presión y compararla con el análisis de la señal de humedad relativa y temperatura.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La estructura de este proyecto está dividida en ocho capítulos, que se detallan a continuación.

- **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.** Aquí se ha realizado una breve introducción para explicar de forma resumida en qué consiste este proyecto, así como se explica cuál es la motivación para realizar este trabajo y también los objetivos que se buscan alcanzar al finalizar este documento.
- **CAPÍTULO 2: LECHOS FLUIDOS.** En este capítulo lo que se busca es tener un primer acercamiento a lo que es un lecho fluidizado, por lo que primeramente se hace un resumen sobre la historia de esta tecnología, explicando desde cuando se empezó a utilizar y hasta donde se ha llegado a desarrollar en la actualidad. Además se presenta una definición de lo que es la fluidización, se explica cómo es el comportamiento de un lecho fluido y lo que significa la calidad de fluidización. También se explica cómo se han de caracterizar las partículas de arena y se hace un análisis de la influencia que tiene la formación de burbujas en el interior de un lecho fluidizado. En otro



apartado, se presentan las aplicaciones industriales más habituales donde se usa esta tecnología y finalmente se presenta un listado de ventajas y desventajas que implican usar tecnologías basadas en un lecho fluidizado.

- **CAPÍTULO 3: MÉTODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN.** Se explica de manera global los métodos de caracterización que existen, luego se explican los dos métodos más utilizados debido a su sencillez y facilidad de implementación. Estos métodos son: el de la pérdida de carga en el lecho y el de las fluctuaciones de presión. Como en este proyecto se trabaja con el método de las fluctuaciones de presión, se explica en más detalle en qué consiste, cómo se lo debe aplicar y las herramientas que se utilizan para implementar este método.
- **CAPÍTULO 4: INSTALACIÓN.** Se hace un esquema de toda la instalación que se usa en el laboratorio y para poder explicar detalladamente en qué consiste todo el equipo utilizado y que sea de fácil comprensión cuál es la función de cada componente se ha dividido la instalación en tres partes que son: el lecho, el fluido de trabajo y las partículas sólidas, y finalmente el equipo de medida.
- **CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.** Se realiza una explicación detallada del procedimiento que se sigue para llevar a cabo las mediciones, tanto en el caso en el que el lecho está sin aglomerados para determinar el estado de control, tanto como cuando se simula la formación de aglomerados mediante la inyección de agua en el interior del lecho.
- **CAPÍTULO 6: MÉTODO DE ANÁLISIS DE LAS SEÑALES.** Al inicio de este capítulo se hace un esquema con el objetivo de resumir los métodos que se utilizan para analizar las señales. A continuación se explica por un lado el método basado en las fluctuaciones de presión, en donde mediante la desviación típica se obtiene los tiempos de defluidización y los tiempos de regeneración, también mediante la densidad espectral de potencia (PSD) se determina la frecuencia característica del lecho. Por otro lado se explica el método para analizar las señales de temperatura y de humedad relativa de tal forma que se puede determinar el tiempo de secado del agua inyectada en el interior del lecho.
- **CAPÍTULO 7: RESULTADOS.** Se presentan los resultados que se obtuvieron luego de haber aplicado el método de las fluctuaciones de presión y el de la temperatura y la humedad relativa. Se presentan dos tablas con los resultados de los tiempos de defluidización y de regeneración, así como los tiempos de secado.
- **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.** Se exponen las conclusiones que se han obtenido luego de haber aplicado los dos métodos anteriormente explicados.



CAPÍTULO 2: LECHOS FLUIDOS

En el presente capítulo se hace un breve resumen histórico del origen de los lechos fluidos así como su evolución hasta la actualidad, con esto se busca introducir algunas de sus principales características de comportamiento así como los distintos estados y regímenes en los que se puede presentar un lecho fluido.

Además también se presenta una visión teórica del cálculo de la caída de presión y de la velocidad mínima de fluidización para entender el nivel de dificultad que presenta el estudio de un lecho fluido.

Adicional a esto, se explica la importancia de las propiedades que deben tener las partículas que son sometidas a la fluidización y cuál es su influencia en el comportamiento del lecho, es decir de su efecto en la formación de las burbujas que aparecen en la fluidización.

Finalmente se presenta las ventajas y desventajas de los lechos fluidos y algunas de las aplicaciones industriales que existen hasta el día de hoy.

2.1. HISTORIA

Se tiene constancia que el científico alemán Fritz Winkler, en Diciembre de 1921 realizó el siguiente experimento: Por la parte inferior de una vasija que mantenía un cierto nivel de partículas de carbón gracias a un alimentador, inyectó ciertas cantidades de aire y de vapor de agua a una determinada temperatura que se obtenía mediante el suministro frecuente de calor, creando así la primera gasificación de carbón en lecho fluido.

La primera aplicación industrial se la lleva a cabo alrededor de 1943 en Estados Unidos para el craqueo catalítico de los gases del petróleo. Estas instalaciones estaban provistas de dos vasijas, en una de ellas se producía las reacciones químicas y en la otra se realizaba la regeneración del catalizador. El primer ensayo efectivo de combustión de carbón utilizando un lecho fluido fue llevado a cabo por el científico Douglas Elliott a principios de los años 60; por lo que se le atribuye el mérito de generar vapor mediante el uso de lecho fluido.

La utilización de lechos fluidos en la producción de energía adquirió un gran repunte debido a la crisis de petróleo que se produjo en los años 70, ya que el aumento del precio de los hidrocarburos obligaba a que la sociedad buscara nuevas fuentes de energía.

A partir de esta crisis se ha seguido investigando y desarrollando tecnologías basadas en la utilización de los lechos fluidos, hasta el punto de que hoy en día se usa esta tecnología en aplicaciones tan diversas tales como la industria farmacéutica, desarrollo de microorganismos e incluso en el procesado de minerales.

En la actualidad aún se siguen realizando investigaciones sobre esta tecnología, realizándose experimentos que tienen como objetivo poder caracterizar el



comportamiento del lecho fluido sometido a diferentes regímenes de fluidización aunque hay que decir que al día de hoy no se ha logrado obtener una teoría sólida que explique dicho comportamiento ya que todas las investigaciones realizadas se han efectuado en instalaciones de pequeña y con el gran inconveniente de que la implementación a gran escala aún no ha sido posible debido al complejo comportamiento hidrodinámico de los lechos fluidos y a las reacciones tan complejas e impredecibles que se producen en el seno de un lecho.

2.2. DEFINICIÓN DE FLUIDIZACIÓN

La fluidización es el fenómeno que se origina cuando se hace pasar un fluido o gas a través de partículas sólidas a una velocidad adecuada como para que ambas sustancias se mezclen de manera homogénea y que dicha mezcla llegue a comportarse como un fluido. Cuando se llega a dar este comportamiento se puede observar la generación de burbujas en el interior del lecho, dichas burbujas favorecen el contacto entre partículas lo cual es bueno ya que promueven el intercambio térmico, reacciones químicas, etc.

Es importante el estudio de las características que presenta el flujo que pasa a través de las partículas sólidas del lecho ya que dichas características son un factor importante para controlar y predecir el comportamiento de un lecho fluido y de igual manera esto permite diferenciar distintos regímenes de funcionamiento.

Tomando en cuenta que el fluido tiene una velocidad vertical que asciende a baja magnitud y que atraviesa el lecho de partículas finas, en un primer instante el fluido se filtra por los espacios que existen entre partículas, las cuales permanecen estáticas, este estado se denomina **lecho fijo (ver figura 2.1 (a))**.



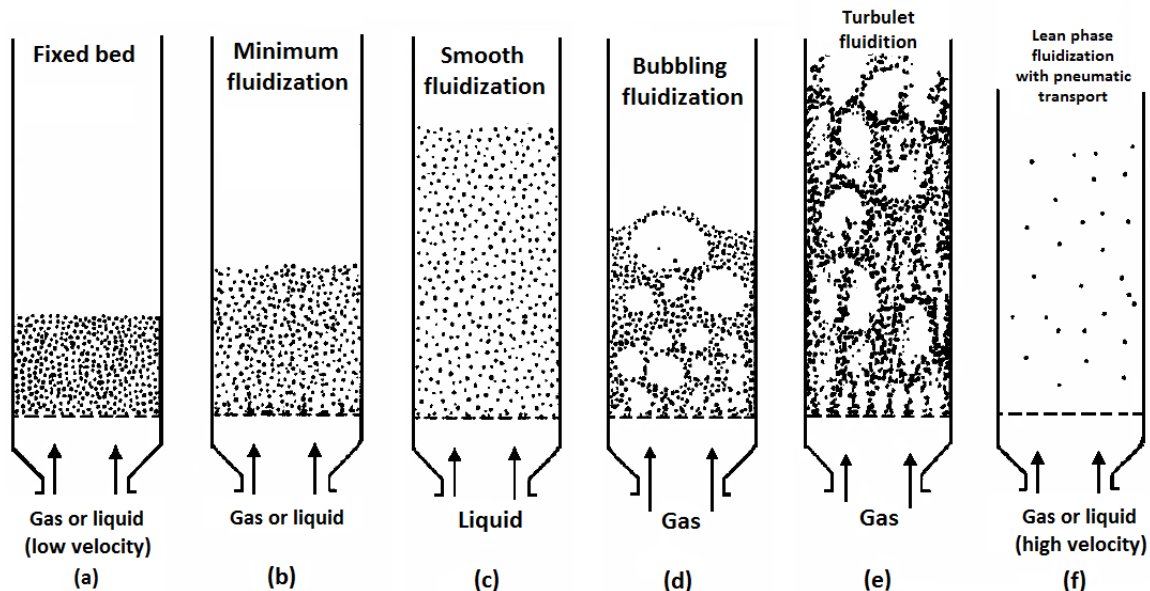


Figura 2.1 Distintas formas de contacto entre el fluido y las partículas que forman el lecho fluidizado: (a) Lecho fijo, (b) lecho en comienzo de fluidización, (c) lecho con fluidización no burbujeante, (d) lecho con fluidización burbujeante, (e) fluidización turbulenta, (f) fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas.

Al incrementar la velocidad del fluido las partículas se comienzan a mover de manera independiente gracias a las pequeñas vibraciones que se originan, al seguir subiendo la velocidad del fluido de manera progresiva se llega a un estado donde las partículas se quedan suspendidas en el flujo del fluido en donde la fuerza de fricción que existe entre las partículas y el líquido se iguala al peso de éstas, por lo que desaparece la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes, esto da como resultado que la pérdida de carga en un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas por unidad de área.

El estado que se ha explicado en el párrafo anterior se llama **lecho en comienzo de fluidización, fluidización incipiente o lecho en mínima fluidización** (ver figura 2.1 (b)). Es aquí donde se establece la transición entre un lecho fijo y un lecho fluidizado completamente, con lo que aparece la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).

Una velocidad mayor a la de mínima fluidización produce un comportamiento distinto dependiendo de si se trata de un lecho líquido-sólido o si es un lecho gas-sólido.

En el caso de que sea un sistema líquido-sólido, si se tiene un incremento de velocidad superior al de mínima fluidización generalmente se origina una pequeña expansión del lecho, la cual va apareciendo de manera progresiva y por tanto las pequeñas inestabilidades que pueden aparecer por consecuencia de un flujo irregular se amortiguan, con lo cual bajo condiciones normales no se pueden apreciar heterogeneidades ni tampoco aparición de burbujas dentro del lecho, en estas condiciones el lecho se denomina **lecho de fluidización particulada, no burbujeante u homogénea** (ver figura 2.1 (c)).

Si se trata de un sistema gas-sólido, este tipo de fluidización solo se produce en ciertos casos cuando las partículas son muy ligeras y con un gas denso a alta presión.

Por norma general los sistemas fluidizados por gas tienen un comportamiento muy diferente ya que si se eleva la velocidad por encima de la de mínima fluidización se pueden apreciar grandes inestabilidades y se puede identificar claramente la aparición de burbujas y de canales o caminos preferentes por donde se mueve el gas. Si se sigue incrementando la velocidad la agitación del lecho pasa a ser muy violenta y esto provoca que la expansión ya no es mucho mayor a la del volumen de mínima fluidización; a este comportamiento del lecho se le designa como **fluidización agregativa, burbujeante o heterogénea (ver figura 2.1 (d))**.

En casos muy puntuales, este comportamiento puede darse con sistemas líquido-sólido si se trabaja con sólidos muy densos y con líquidos de densidad baja.

Si se aumenta la velocidad del gas de manera considerable se puede sobrepasar el valor de la velocidad terminal de los sólidos, dando como resultado el arrastre de partículas que a su vez provocan que la zona superior del lecho desaparezca. Una vez que se alcanza este estado se puede observar un movimiento turbulento de las partículas y un incremento considerable en la formación de burbujas y del tamaño de las mismas. A este estado se le asigna el nombre de **lecho de fluidización turbulenta (ver figura 2.1 (e))**.

Si se aumenta aún más la velocidad del gas el resultado es que las partículas son despedidas fuera del lecho. A este estado se le denomina **lecho fluidizado disperso, diluido o en fase dispersa con transporte neumático de partículas (ver figura 2.1 (f))**.

Otro fenómeno destacable en los sistemas de gas-sólido es el origen de burbujas de gas que van creciendo a medida que ascienden entre las partículas y llegando a producirse una coalescencia de las mismas.

En algunos casos cuando los lechos son muy altos en relación a su diámetro se produce el fenómeno denominado **slugging** que consiste en que las burbujas crecen tanto que llegan a ocupar todo o casi todo el diámetro del depósito que contiene al lecho. Si se trabaja con partículas muy finas, estas caen de tal forma que rodean a las burbujas, haciendo que las burbujas cada vez sean más grandes y asciendan por la zona central del depósito. A este tipo de slugging se le denomina **slugging con slugs (burbujas) axiales (ver figura 2.2 (a))**.

En el caso de que las burbujas asciendan pegadas a las paredes del depósito el fenómeno adquiere el nombre de **slugging con burbujas de pared (ver figura 2.2 (b))**.

En el caso de partículas mas grandes y que han dado lugar al fenómeno de slugging hacen que la fracción de lecho que está por encima de las burbujas sea empujada hacia arriba como si de un pistón se tratara. Las partículas vuelven a caer una vez que el slug o burbuja desaparece al alcanzar el punto mas alto del lecho. Este comportamiento inestable vuelve a repetirse dando lugar al fenómeno llamado **slugging planos (ver figura 2.2 (c))**.



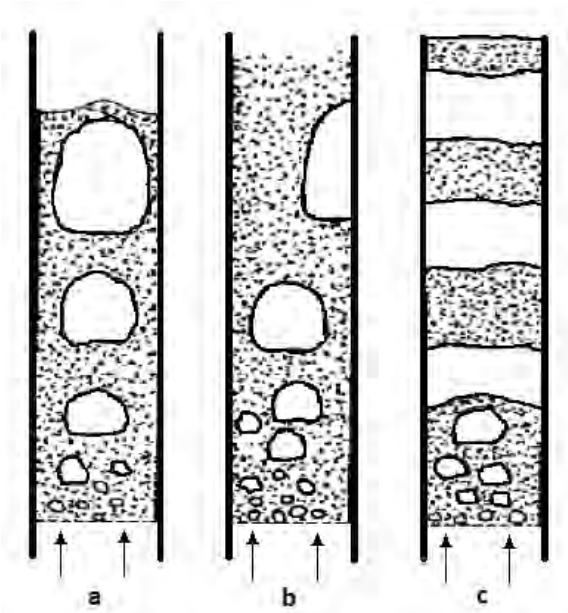


Figura 2.2: (a) *slugging con burbujas axiales*, (b) *slugging con burbujas de pared*, (c) *slugging plano*.

2.3. COMPORTAMIENTO DE UN LECHO FLUIDO

Al realizar experimentos sencillos es factible ilustrar el comportamiento de un lecho fluido y verificar que es semejante al de los líquidos. Cuando un lecho de partículas en fase densa es fluidizado con gas se puede ver que su comportamiento es similar al de un líquido en ebullición. Por tanto si un objeto grande en relación a las partículas y de menor densidad se sumerge en el seno del lecho y se deja libre, dicho objeto tiende a salir a la superficie y se mantiene flotando sobre ella, al igual que ocurriría si se estuviera utilizando cualquier fluido de mayor densidad (ver figura 2.3 (a)).

También se observa claramente que si se inclina el depósito que contiene el lecho, la superficie de este siempre tenderá a mantenerse horizontal al igual que ocurriría con un depósito que contenga cualquier fluido ya que esto es debido al potencial gravitatorio (ver figura 2.3 (b)).

Además, si dos lechos independientes son conectados, lo que sucede es que sus niveles se igualan a través del conducto que está uniendo los depósitos (ver figura 2.3 (c)).

Otro aspecto que se puede observar es que si se hace un orificio en la parte inferior del depósito, las partículas que conforman el lecho fluirán hacia el exterior del depósito formando un chorro al igual que si se tratara de un líquido (ver figura 2.3.(d))

También hay que recalcar que de la misma forma que sucede en un líquido en un lecho fluido se cumple que la diferencia de presión en dos puntos distintos es directamente proporcional a la diferencia de alturas (ver figura 2.3 (e)).

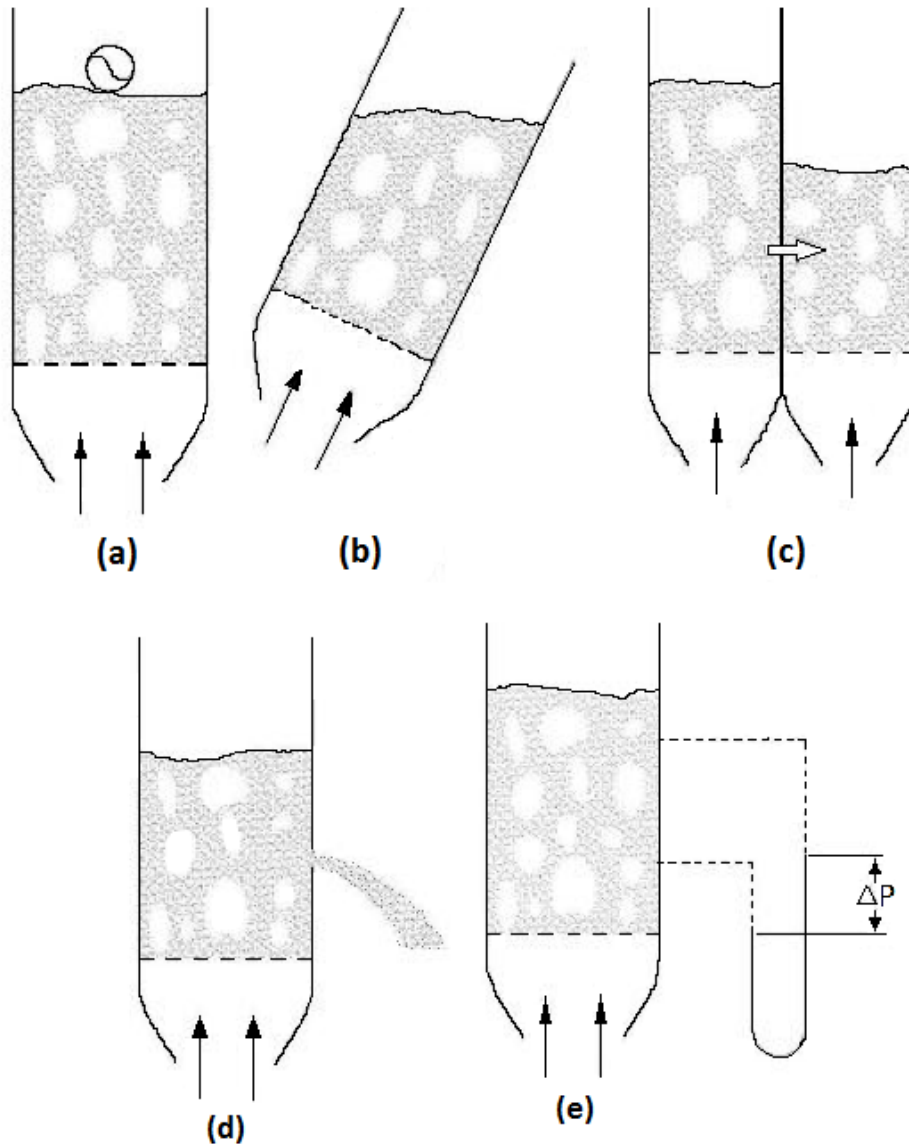


Figura 2.3: Comportamiento de un lecho fluido

2.4. CALIDAD DE FLUIDIZACIÓN

La palabra fluidización se refiere tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, aunque es en la fase densa donde interesa realizar las distintas investigaciones. Cuando se trabaja con un lecho fijo existen muchos factores que influyen en la capacidad de fluidización de las partículas, además estos factores varían mucho de un sistema a otro.

El primer factor y el más relevante es el tamaño de los sólidos y el tipo de distribución de estos sólidos. Generalmente cuando se utilizan partículas pequeñas, éstas tienden a aglomerarse cuando están húmedas por lo que se requiere de una agitación del lecho para asegurar una correcta fluidización. Esta agitación se suele efectuar mediante agitadores mecánicos o aplicando velocidades relativamente altas al gas para aprovechar la energía cinética y de esta forma poder agitar las partículas sólidas.

Si se trata de partículas finas que tienen una amplia distribución de tamaños tienen la capacidad de fluidizar dentro de un rango muy amplio de velocidades del gas, con la ventaja de que esto permite trabajar con lechos profundos y grandes con lo cual se obtiene un cierto grado de flexibilidad.

Si se trabaja con partículas grandes y con una distribución de tamaño uniforme se tiene como resultado una mala fluidización ya que se suelen producir sacudidas, chorros y slugging, lo que puede originar daños en la instalación. Para solucionar este problema se puede añadir partículas más finas, las cuales funcionan como lubricante de las partículas más grandes. Por tanto el rango de velocidades que se utiliza para trabajar con partículas más grandes es mucho más reducido, que si se trabaja con partículas pequeñas. Como consecuencia de esto los lechos formados por partículas grandes deben tener poca profundidad para poder llevar a cabo la fluidización.

Existe otro factor muy relevante que condiciona la calidad de fluidización y es la relación que existe entre la densidades del fluido y la densidad de las partículas. Por norma general los lechos que funcionan con un sistema sólido-líquido fluidizan de forma homogénea, mientras que los que funcionan con un sistema sólido-gas fluidizan de manera heterogénea.

Indistintamente de si se trabaja con un sistema sólido-líquido o sólido-gas es factible identificar comportamientos poco comunes si se trabaja con partículas de baja densidad en gases de alta densidad o con partículas de elevada densidad con líquidos de poca densidad.

También existen otros factores que pueden afectar a la calidad de fluidización como son: geometría del lecho, los dispositivos de alimentación del gas, el material de la partícula utilizada.

2.5. CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS

Cuando los sólidos que conforman un lecho son suspendidos en una corriente ascendente, dicho lecho se puede comportar de las siguientes formas: fluidizandose de manera suave sin presencia de burbujas, con presencias de burbujas o en forma de chorro. Anteriormente ya se explicó que el comportamiento de un lecho está ligado en gran parte al tipo de solidos utilizados, por lo que a continuación se expone como influye el tipo de partículas y también se ofrece una clasificación universal que hoy en día se utiliza en laboratorios.

2.5.1 Propiedades de las partículas

Para determinar la masa de las partículas se utiliza la densidad de la partícula (ρ_p), la cual se define como la relación entre la masa de una partícula (m_p) y el volumen hidrodinámico de la misma (V_h). Se define volumen hidrodinámico al volumen que ve el fluido cuando rodea a la partícula incluyendo todas las imperfecciones y poros.

Cuando las partículas son perfectas y sin poros ni defectos se puede medir la densidad de la partícula con gran facilidad, utilizando aparatos de medida como el picnómetro, pero estos aparatos no sirven para medir partículas porosas o con defectos ya que lo que se obtiene es la densidad absoluta (ρ_{abs}) que es la masa de la



partícula dividida entre el volumen de material sólido que compone la partícula, por lo que esta densidad no es apropiada cuando se realiza el estudio de la interacción con un fluido.

En el caso de las partículas porosas, es muy complicado determinar directamente la densidad de partícula por lo que se han propuesto varios métodos para poder obtener su valor.

La densidad aparente (ρ_b) es más fácil determinarla y se define como la masa total de las partículas contenidas en el lecho (m_b), dividida entre el volumen aparente (V_{ap}) que es el volumen que ocupan dichas partículas, incluyendo el espacio entre las mismas.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (1) \qquad V_{ap} = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (2)$$

Donde:

- D es el diámetro del lecho.
- L es la altura del lecho que ocupa el volumen V_{ap} .

2.5.2 Clasificación de las partículas de fluidización

Dependiendo del tipo de partículas que se utilice las propiedades del lecho así como su forma de operar varían. Por tanto Geldart (1973) formuló una clasificación de las partículas diferenciándolas en cuatro grandes grupos (A, B, C, D), basados en sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. En la actualidad se usa esta clasificación en varios campos.

Si se fluidizan partículas con aire bajo condiciones ambiente y se obtiene una región del lecho con fluidización no burbujeante aplicando la velocidad mínima de fluidización y a continuación hay una fluidización burbujeante a medida que se incrementa la velocidad, se puede afirmar que las partículas que presentan este comportamiento son las que pertenecen al grupo A y si las partículas presentan únicamente un comportamiento burbujeante tanto a velocidad mínima de fluidización como por encima de esta se concluye que pertenecen al grupo B.

El grupo C está constituido por partículas muy finas y cohesivas que carecen de la capacidad de fluidizar.

Por último está el grupo D que se caracteriza porque las partículas de mayor tamaño forman lechos de chorro.



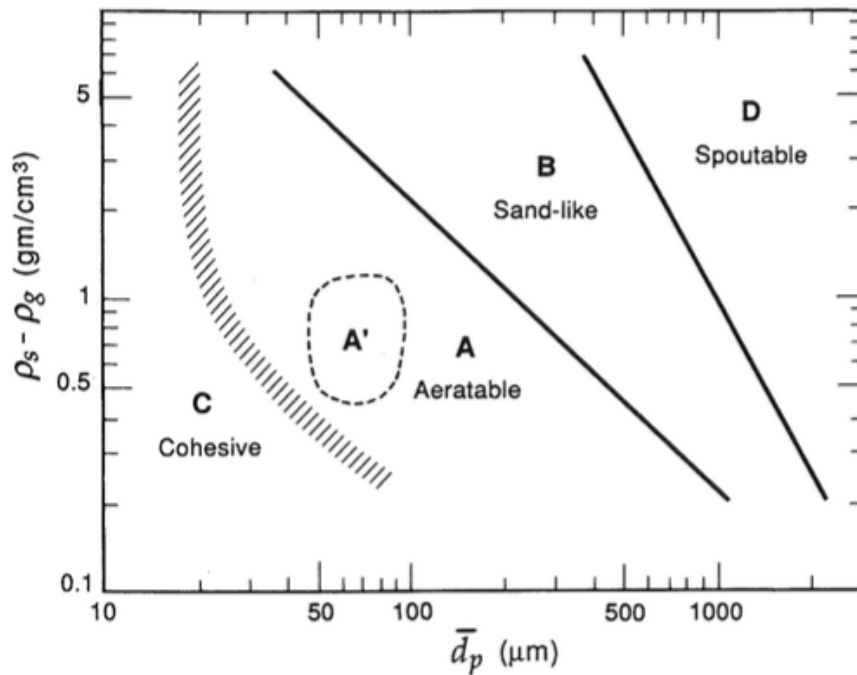


Figura 2.4: Clasificación de las partículas según Geldart (1973) por peso y tamaño.

Las propiedades que adquiere una partícula que se ha fluidizado con aire son factibles de predecir si dicha partícula pertenece a uno de estos cuatro grupos, a pesar de esto también se debe tener en cuenta que si la fluidización se lleva a cabo a temperaturas y/o presiones distintas de la atmosférica es posible que una partícula adquiriera un comportamiento propio de un grupo diferente al que pertenecería si se trabajara en condiciones estándar.

El estado de fluidización burbujeante es el estado que comúnmente aparece en sistemas de uso comercial y como consecuencia de esto es frecuente que en las aplicaciones comerciales se encuentren partículas que pertenecen al grupo A ya que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante es muy pequeño. La velocidad superficial del gas a la que se originan las primeras burbujas se le denomina con el nombre de Velocidad mínima de burbujeo (U_{mb}).

También es factible clasificar las partículas según su Velocidad mínima de burbujeo (U_{mb}) respecto a su velocidad de mínima fluidización (U_{mf}) puesto que es muy necesario que en ciertas aplicaciones se conozca el comportamiento frente al burbujeo de las partículas.

En el caso de las partículas que pertenecen al grupo A, donde se cumple que $U_{mb} > U_{mf}$, las burbujas se separan y coalescen frecuentemente existiendo un tamaño máximo de burbuja, lo que provoca que la fluidización se desarrolle suavemente y que sea de buena calidad.

En el caso de las partículas que están catalogadas dentro del grupo B y D, donde se cumple que $U_{mb} = U_{mf}$, las burbujas van aumentando de tamaño de manera continua sin la posibilidad de apreciar un límite de tamaño máximo de burbuja. Esto provoca

que la fluidización sea de peor calidad y además presenta grandes fluctuaciones de presión.

Cuando se trata de partículas que pertenecen al grupo C, se sabe que las fuerzas entre partículas son mucho mas grandes si se las compara con las fuerzas de inercia. Por lo tanto las partículas no tienen la capacidad de alcanzar la separación suficiente para ser totalmente suspendidas y como resultado es inviable conseguir la fluidización. Cuando sucede esto es normal que en lugar de aparecer burbujas lo que pasa es que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. A pesar de esto se puede conseguir la fluidización mediante el uso de agitadores mecánicos o mediante vibración.

En el caso de que las burbujas alcancen un tamaño aproximado de 0,6 veces el diámetro del lecho se puede afirmar que se ha formado un slug de gas. Se debe evitar la aparición del slugging ya que este fenómeno da lugar a grandes fluctuaciones de presión que provocan vibraciones importantes en las instalaciones. Este fenómeno se evitaría si la velocidad superficial del gas fuera relativamente moderada y además el tamaño del lecho fuera grande en comparación al tamaño de las burbujas.

A continuación en la tabla 2.5 se presenta un resumen de la clasificación de Geldart (1973), en base a varias características de las partículas y otros aspectos referentes a su fluidización.



	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización. Muestran un rango de no burbujeo.	Comienzo de burbujeo a V_{mf}	Cohesiva, dificultad para fluidizar	Sólidos bastos
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, cemento	Grava, Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, solo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Solo en lechos poco profundos	No	Si, incluso en lechos profundos

Tabla 2.5: Clasificación de Geldart (1973) atendiendo al comportamiento de las partículas.

2.6. BURBUJAS EN EL LECHO FLUIDO

La gran mayoría de las propiedades de los lechos fluidos que funcionan con un sistema gas-sólido son definidas por el comportamiento de las burbujas, por lo que es de gran importancia conocer el comportamiento de dichas burbujas.

Las variaciones de presión provocada por el paso de las burbujas en el seno del lecho se puede utilizar como una medida indirecta para determinar el tamaño de las burbujas, así como la velocidad con la que ascienden. Medir la presión también es útil ya que permite que el individuo que está realizando las mediciones pueda hacerse una idea de en qué régimen de fluidización se está trabajando.



2.6.1 Formación y crecimiento de burbujas

En este apartado se explica que la formación de burbujas en el interior de un lecho fluido es similar a la formación de burbujas en un líquido con densidad baja. Si se introduce aire en un líquido a través de un orificio se forma una hilera de burbujas que desplazan el líquido y emergen hacia la superficie si su densidad es menor, de tal forma que cuando llegan a la superficie estas burbujas explotan dando lugar a fluctuaciones de presión.

Lo que ocurre en un lecho de partículas es similar a lo explicado anteriormente, se introduce aire a través del distribuidor, por lo que se forman burbujas que suben por el lecho dando lugar a fluctuaciones de presión. A continuación se presentan algunas semejanzas que tienen las burbujas de un lecho fluido con las burbujas que hay en un líquido de baja viscosidad.

- Tanto en el lecho fluido como en el líquido las burbujas son casi esféricas cuando son pequeñas, a medida que van creciendo son alargadas y deformadas, y cuando ya son de mayor tamaño adquieren forma de tapón.
- En ambos casos el ascenso de las burbujas mas pequeñas es lento y su velocidad se va incrementando a medida que van aumentando de tamaño, hasta el punto en que una serie de burbujas pequeñas pueden coalescer en una de mayor tamaño.
- La interacción entre las burbujas da como resultado velocidades de ascenso diferentes, pero que tienen la misma dirección.
- Las paredes producen un efecto que actúa en la misma dirección que la velocidad de ascenso de las burbujas.
- Cuando se inyecta un exceso de gas en un lecho fluido, este pasa a través de las partículas sólidas a modo de burbujas.

Por tanto los estudios que se han realizado indican que un lecho fluido en condiciones de mínima fluidización puede ser manejado como si se tratara de un líquido de baja densidad. Si la velocidad del gas es mayor a la de mínima fluidización, el exceso de aire que existe en el lecho pasa a través de los sólidos en forma de burbujas que suben de forma similar a las burbujas que se forman en un líquido de baja densidad.

El valor de la fracción de vacío en la **fase densa** del lecho, es decir la fase en la que aún no hay burbujas, es muy parecido al valor de la fracción de vacío en condiciones de mínima fluidización (ϵ_{mf}). Si la velocidad es alta, el ascenso de las burbujas provoca fluctuaciones importantes y además se produce el arrastre de sólidos.



2.7 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA FLUIDIZACIÓN

Las características de los lechos fluidos permiten que este tipo de tecnología aunque sea relativamente nueva, tenga una gran variedad de aplicaciones en varios procesos industriales como se expone a continuación:

2.7.1 Operaciones físicas

2.7.1.1 Intercambio de calor

Una de las aplicaciones más comunes de los lechos fluidizados es la de usarlos como intercambiadores de calor, ya que poseen una enorme facilidad para transferir calor y también para mantener la uniformidad de la temperatura durante el funcionamiento del lecho. Por estos motivos es interesante usarlos cuando se requiere enfriar de manera súbita metales o aleaciones para obtener propiedades concretas. En algunos casos el intercambio de calor se produce sin la necesidad de que haya contacto entre las partículas y el fluido de refrigeración que circula a través de tubos que se encuentran en el interior del lecho. Un ejemplo claro de esto consiste en dejar circular un caudal de agua a lo largo de un sistema de tuberías sumergidas en un lecho fluidizado de partículas que se encuentran a alta temperatura, de tal modo que se va recuperando el calor que tienen dichos sólidos y de esta forma se consigue producir vapor.

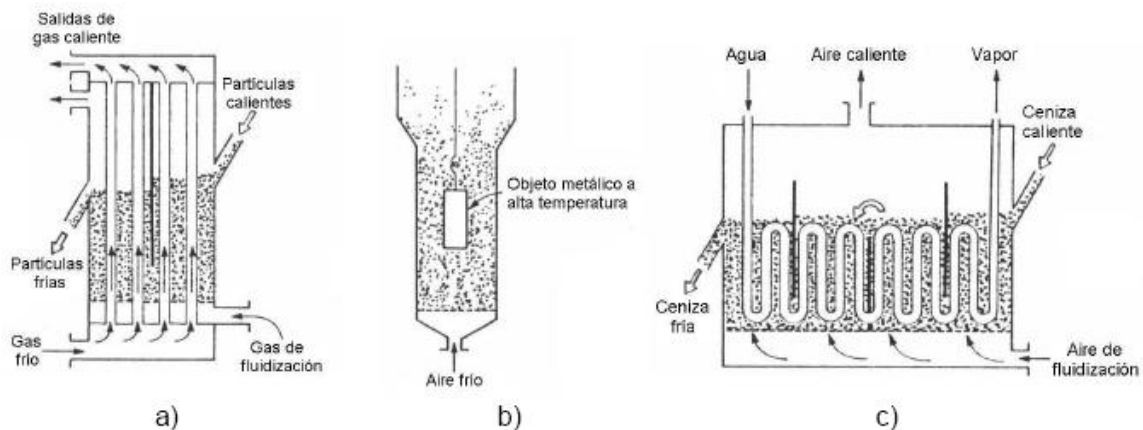


Figura 2.6: Ejemplos de intercambiadores de calor con lecho fluidizado. a) aplicación para calentar un gas. b) Se usa para el enfriamiento rápido de metales. c) Se usa para la generación de vapor a partir de partículas calientes.

2.7.1.2 Recubrimiento de metales

Gracias a los lechos fluidos se puede recubrir objetos de metal con una capa de plástico. Para lograr este recubrimiento se sumerge una pieza metálica en un lecho que contiene partículas finas de plástico durante un tiempo corto y a una temperatura que esté por encima del punto de fusión del material plástico. Así se consigue que las

partículas se fundan y se adhieran a la superficie de la pieza metálica de tal manera que se forma una capa que recubre todo el material.

2.7.1.3 Adsorción

Los lechos fluidos también se suelen utilizar para realizar la adsorción de algunos componentes que están presentes en el gas que se desea eliminar. Por tanto se deberá utilizar un lecho fluido que posea partículas adsorbentes, cuyo proceso se verá beneficiado por la alta capacidad de mezclado que posee el lecho. Por la parte superior del lecho saldrá el aire limpio y por la parte de abajo serán expulsadas las partículas con el material adsorbido. Un claro ejemplo de esto es la retirada de solventes como son el bisulfato de carbono, la acetona y el etanol, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales.

2.7.1.4 Secado de sólidos

El secado por medio de lechos fluidizados se utilizan en gran número de aplicaciones industriales a causa de su gran capacidad, su bajo coste de construcción, su facilidad de operación y sobre todo por su alta eficiencia térmica. Se utilizan principalmente para el proceso de secado de arenas, polímeros, productos farmacéuticos, minerales o fertilizantes, tomando en cuenta que para todas estas aplicaciones se han desarrollado una infinidad de diseños. Una característica de los lechos fluidizados en todas estas aplicaciones es que suelen trabajar en regímenes turbulentos debido a que se requiere una alta capacidad de mezclado.

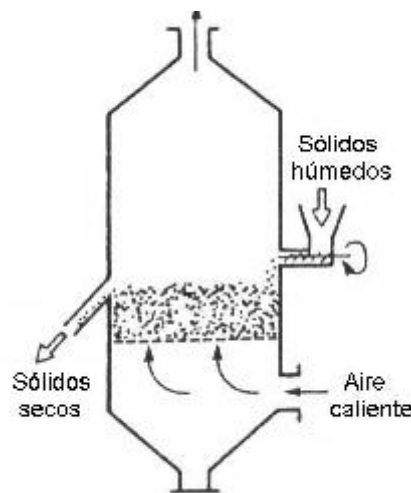


Figura 2.7: Secado de sólidos.

2.7.2 Reacciones de síntesis

Dentro de la industria se producen enormes cantidades de reacciones, de las cuales muchas solo se pueden llevar a cabo dentro de ciertos intervalos de temperatura ya sea porque si la reacción se da fuera de esos intervalos se convierte en explosiva o simplemente los resultados esperados solo se producen en esos determinados rangos de temperatura. Hay que tomar en cuenta que este tipo de reacciones suelen ser muy exotérmicas por lo que el control de su temperatura es complejo.

Los gases son pésimos conductores de calor y tiene valores muy bajos de capacidad calorífica, por lo que son idóneos para impedir la distribución de calor cuando se trabaja con reacciones altamente exotérmicas.

Antes, si se quería llevar a cabo estos procesos se necesitaba utilizar intercambiadores de calor de gran tamaño y además tener previamente los gases bastante diluidos. Hoy en día esto ya no es necesario ya que los lechos fluidos tienen una gran capacidad de mezclado y si a esto se le suma el uso de partículas con altas capacidades caloríficas, es factible alcanzar un buen control de la temperatura. Algunos ejemplos de reacciones de síntesis donde se hace uso de lechos fluidos son: La producción de anhídrido naftalénico, la síntesis de Fischer-Tropsch, el acrílico nitrilo, el acetato de vinilo o el clorometano.

2.7.3 Craqueo de hidrocarburos

El proceso de la rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, usando reacciones denominadas de craqueo presentan dos características principales. La primera es que las reacciones son endotérmicas y la segunda es que se produce una deposición de carbono en la superficie de las partículas cercanas. Es importante considerar estas dos características junto a que se debe tratar enormes cantidades de material para poder determinar el proceso industrial más indicado a utilizar. Normalmente estos procesos se implementan en dos módulos. Un primer módulo está diseñado para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbono, mientras que el segundo módulo es donde el carbono depositado se quema y de esta manera se recupera el calor y se lo devuelve al primer módulo a través de las propias partículas en recirculación. El calor que finalmente se ha conseguido se usa para que se lleve a cabo la reacción en el primer módulo. Este proceso se implementa utilizando un sistema de recirculación formado por uno o más lechos fluidizados.



2.7.3.1 Craqueo catalítico fluido

Si se usa un catalizador adecuado con los hidrocarburos pesados que se encuentran en fase de vapor, estos se dividen en elementos de menor peso molecular. Hay varios factores que intervienen en este proceso pero el de más relevancia es el modo en el que se abastece la gran cantidad de calor que se necesita para que se produzca la reacción endotérmica y además la manera de regenerar las partículas catalizadoras rápida y eficientemente. El método de craqueo catalítico fluido o FCC, que proviene del inglés Fluid Catalytic Cracking, es el método que se basa en el proceso explicado anteriormente.

2.7.3.2 Craqueo térmico

Para poder implementar el proceso de craqueo térmico, es necesario hacer uso de los lechos fluidizados. Su aplicación más frecuente se da en la producción de etileno y propileno a partir de la fragmentación de nafta que se extrae del petróleo a base de reacciones altamente endotérmicas. El etileno y propileno tienen la función de servir como elementos de partida en síntesis orgánicas y en polimerizaciones.

Pese a que se ha logrado desarrollar procesos que solo requieren de un lecho fluido, los sistemas que están compuestos por dos lechos con recirculación de partículas son los que desprenden mejores resultados a la hora de operar.

2.7.4 Combustión e incineración

2.7.4.1 Combustión de carbón

A causa de la escases de petróleo que hubo en los años 70, se iniciaron investigaciones sobre cómo se podría quemar el carbón de baja calidad ya que esto no era posible hacerlo en las caderas convencionales y a causa de esto los lechos fluidizados sufrieron un gran desarrollo en ésta década. En la actualidad el uso de esta tecnología es debido en su mayoría a motivos medioambientales ya que tienen una gran capacidad para reducir las emisiones de óxido de azufre gracias al uso de partículas de CaCO_3 en el lecho fluido y también por su capacidad de reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno debido a que en el interior del lecho no se producen temperaturas demasiado altas, suelen ser del orden de 850 °C.

2.7.4.2 Incineración de residuos sólidos

La incineración de residuos sólidos urbanos tiene varios inconvenientes, pero uno de los principales es que se producen fuertes olores. Normalmente se usan quemadores de parrilla para la incineración de estos residuos ya que térmicamente son muy eficientes, pero en zonas pobladas se vuelven obsoletos ya que desprenden malos olores. A causa de esto se usan incineradores de lecho fluidizado ya que permiten quemar de manera eficiente combustibles de bajo poder calorífico y de alto contenido



en cenizas. Previamente los elementos metálicos son retirados, luego los residuos son triturados y posteriormente son quemados en el interior del lecho a una temperatura aproximada de 900°C. El calor residual es evacuado del lecho mediante un circuito de agua, con lo cuál se puede aprovechar para producir energía. La ceniza siempre se elimina por la parte inferior del lecho.

Con la finalidad de aumentar la eficiencia de este tipo de sistemas se debe realizar un pre proceso de tratamiento de los residuos, con el objetivo de retirar los materiales inorgánicos.

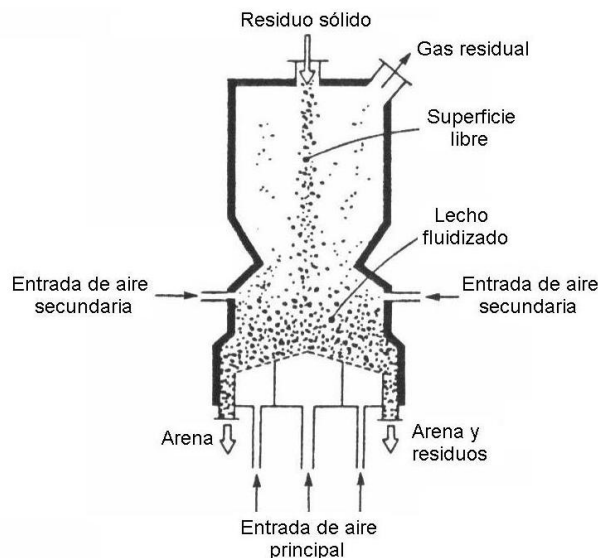


Figura 2.8: Incineración de sólidos mediante lecho fluido.

2.7.5 Gasificación

2.7.5.1 Gasificación de carbón

Uno de los primeros usos de los lechos fluidos tuvo fines comerciales y consistió en la gasificación del carbón para obtener energía. La gasificación de este material no es otra cosa más que quemar carbón con muy poco oxígeno de tal forma que el combustible sólido se convierta en gas, además que se facilita la eliminación de impurezas, por lo que este sistema se suele utilizar en procesos de combustión exigentes en cuanto a calidad de combustible se refiere.

El producto sólido que se obtiene se denomina **char** y está formado por cenizas y residuos carbonosos. La gasificación se puede realizar mediante diferentes agentes, como pueden ser: el aire, el oxígeno, el vapor de agua o el hidrógeno y de estos elementos dependerá el contenido energético del gas que se ha obtenido.

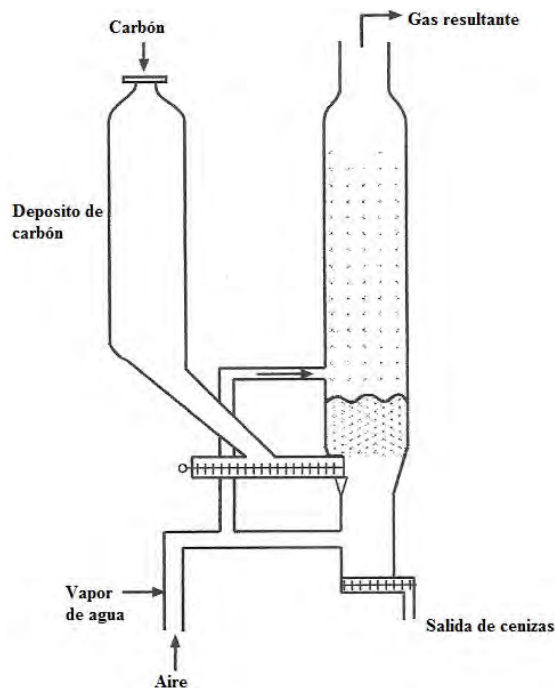


Figura 2.9: Gasificación de carbón.

2.7.5.2 Gasificación de residuos sólidos urbanos

A menudo los residuos urbanos suelen contener materiales que al ser incinerados desprenden gases tóxicos y que por tanto deben ser tratados adecuadamente para no perjudicar al medio ambiente. La implementación de los lechos fluidos es muy adecuada en estos casos ya que la emisión de gases es notablemente menor en comparación a la emisión de los sistemas convencionales de incineración. Las instalaciones para este objetivo suelen estar compuestas por dos lechos fluidos que operan en paralelo y en régimen turbulento. En uno de los lechos se realiza la combustión de los residuos sólidos con arena, los materiales que salen de este por su parte superior, entran en el segundo lecho por su parte inferior en donde se queman por completo y calientan la arena.

La arena que se ha calentado en el segundo lecho se vuelve a introducir en el primero con el fin de aportar la suficiente energía para producir la gasificación.

2.7.6 Activación del Carbón

El carbón activado es utilizado para eliminar contaminantes mediante la adsorción en corrientes líquidas y gaseosas, para separar sustancias orgánicas, en recuperación de solventes y también se usa como catalizador en algunas reacciones químicas.

El proceso para obtener carbón activado es el siguiente: Se comienza con la etapa de carbonización de tal forma que se logra la deshidratación y la devolatilización de

manera controlada y por consiguiente obteniéndose un carbonizado con un porcentaje elevado de carbono fijo y una estructura inicial porosa.

A lo largo de la carbonización los elementos que no son carbonosos tales como el hidrógeno y el oxígeno son eliminados en parte por la pirolisis del material permitiendo que los átomos de carbono se ordenen en estructuras microcristalinas denominadas con el nombre de **“cristalitas gráficas elementales”**. Existen unos espacios entre estos microcristales, debido a que su organización no es regular, dichos espacios o intersticios son ocupados por carbono amorfo, alquitranes y otros residuos, producto de la descomposición pirolítica del material celulósico.

Los carbones producto del proceso de carbonización sólo muestran una pequeña capacidad de absorción, la misma que se irá incrementando mediante el proceso de activación. A una temperatura que está entre 800 y 1100 °C se lleva a cabo la activación mediante el uso de un oxidante que actúa como agente activante. Este activante puede ser CO₂, o vapor de agua.

2.7.7 Calcinación

Existe algunos materiales especiales tales como la caliza y la dolomita, cuyas partículas pueden ser calcinadas con gran facilidad en un lecho fluido quemando directamente combustible en su interior. Esta reacción tiene la propiedad de ser altamente endotérmica, lo cuál implica un alto gasto de combustible. Con el objetivo de recuperar calor se suele implementar sistemas multietapa, donde el material en bruto se suele colocar por la etapa superior y a medida que va transcurriendo el tiempo, éste material va cayendo de etapa en etapa. Cuando se llega a la etapa de calcinación se inyecta combustible que se mezcla con el aire de fluidización haciendo que se quemen las partículas. El calor restante se utiliza para aumentar la temperatura de las partículas que están alojadas en las etapas superiores y finalmente los restos calcinados son expulsados por la parte inferior del lecho.

2.7.8 Reacciones con sólidos

Una característica muy interesante de los lechos fluidos es que son excelentes para poder obtener ciertos minerales. Se puede obtener metales mediante la tostación de sulfuros, así como para la producción de silicio de pureza elevada que se suele usar en la fabricación de semiconductores y células solares.



2.7.9 Biofluidización

Una aplicación muy interesante de la fluidización es el cultivo de microorganismos como es el caso del hongo “Aspergillus Soja”, el cuál se utiliza en la producción de la salsa de soja. En primer lugar hay que tratar el trigo y pasteurizarlo con vapor sobrecalentado, posteriormente se debe fluidizar con aire esterilizado. A continuación se debe rociar al lecho con agua con el objetivo de mantener la humedad a un nivel deseado, finalmente se introducen las semillas a través de un eyector.

El cultivo de microorganismos en lechos fluidos, frente al cultivo convencional tiene las siguientes ventajas:

- Gran facilidad para controlar la temperatura, humedad y el pH.
- Incremento de la eficiencia en el crecimiento de la superficie de los microorganismos.
- Mayor eficiencia en la disipación y eliminación de calor y de CO₂ a causa del metabolismo.
- Fácil transferencia de oxígeno por lo que se estimula el metabolismo.

2.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS LECHOS FLUIDOS

2.8.1 Ventajas

- En un lecho si las partículas se han mezclado bien se puede afirmar que tiene una eficaz resistencia a las variaciones de temperatura. Responde de una forma paulatina y uniforme a los cambios bruscos que se pueden dar en las condiciones de operación, lo cual es beneficioso porque implica un buen margen de seguridad ya que por ejemplo se puede evitar pérdidas de temperatura en reacciones que son altamente exotérmicas.
- El hecho de que las partículas presenten un comportamiento fluido durante el estado de fluidización permite llevar a cabo las operaciones con gran facilidad.
- El hecho de que exista circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados permite suministrar o conservar enormes cantidades de energía térmica que se pueden requerir o producir con la ayuda de reactores de gran tamaño.
- La capacidad que tiene un lecho fluidizado para transferir calor a un objeto que está inmerso en él es alta, por lo que los intercambiadores de calor que están sumergidos en lechos fluidizados necesitan una superficie de contacto relativamente pequeña.



- Al mezclarse las partículas con gran rapidez facilitan alcanzar condiciones similares de temperatura en el lecho, lo que permite un control seguro y sencillo de las operaciones isotérmicas.
- Estos sistemas se diferencian de otros sistemas de mezclado ya que poseen una mayor velocidad de transferencia de calor y masa.

2.8.2 Desventajas

- En caso de estar trabajando en operaciones no catalíticas a altas temperaturas, la aglomeración y sinterización de las partículas requerirán una disminución de la temperatura y dando como consecuencia de esto una notable reducción de la velocidad de la reacción.
- En el caso de un lecho con fluidización burbujeante de partículas finas, existe la dificultad para definir el flujo de gas, por lo que esto supone un mezclado poco eficiente. Se debe reparar en esto ya que implica un factor importante cuando se requiere una conversión elevada de reactores gaseosos o una alta selectividad para una reacción intermedia.
- La abrasión que se produce por el movimiento de las partículas erosionan los depósitos y las tuberías de manera considerable. También las partículas más finas en algunas ocasiones suelen ser arrastradas por el gas, por lo que deben ser remplazadas o reconducidas mediante circuitos diseñados con esta finalidad.
- El hecho de que la mezcla de partículas sea muy rápida da como resultado tiempos de residencia variables. En el tratamiento continuo de partículas sólidas se tiene un producto heterogéneo y un rendimiento bajo, sobre todo a altos niveles de conversión. En el caso de reacciones catalíticas el movimiento de partículas catalizadoras porosas que permanentemente atrapan y liberan moléculas de gas reactante, contribuyen al mezclado posterior de reactantes gaseosos, provocando así una disminución importante en el rendimiento del sistema.



CAPÍTULO 3: MÉTODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN

A continuación se presentan los métodos experimentales más utilizados para caracterizar la dinámica de un lecho fluidizado, cabe recalcar que no son los únicos sino que también existen otros métodos incluso más exactos que utilizan tecnologías como la de rayos X, la acelerometría y las señales de presión pero que requieren de mayor tecnología, conocimientos y recursos económicos.

3.1 PÉRDIDAS DE CARGA EN EL LECHO

A medida que el gas asciende a través del lecho de partículas va sufriendo una pérdida de carga debido a la resistencia que ofrecen los sólidos al movimiento. En la figura 3.1 se puede apreciar el comportamiento característico de un sistema gas-sólido.

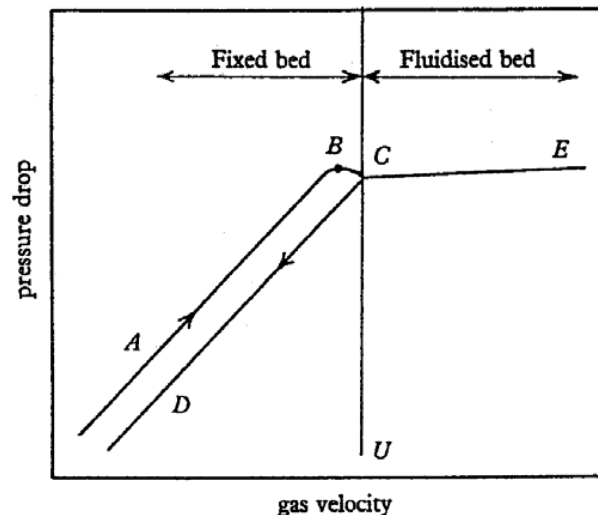


Figura 3.1: Curva Pérdida de Carga vs Velocidad en sistemas tipo gas-sólido.

En la figura 3.1 se representa la relación entre la pérdida de carga en el lecho y a velocidad superficial del gas, donde a medida que se va incrementando la velocidad del gas, también la pérdida de carga en el lecho va aumentando de forma lineal. Es relevante notar que en el punto B la pérdida de carga en el interior del lecho es mucho mayor que la que se requiere para que las partículas se mantengan suspendidas. Si se incrementa la velocidad mínimamente, la presión disminuye lo necesario para poder mantener el peso de las partículas (punto C). Al punto C se lo denomina **punto de mínima fluidización**.

Si desde el punto C se reduce la velocidad hasta cero, se observa que se produce una histéresis ya que el camino recorrido por la pérdida de carga al aumentar la velocidad del gas no es el mismo que se recorre al disminuir dicha velocidad ya que

cuando se fluidiza el lecho, se requiere superar las fuerzas de atracción que existen entre partículas mientras que cuando se efectúa la defluidización no existe la necesidad de vencer estas fuerzas. El punto B será más alto si la relación de compactación entre partículas es mayor. Se puede reducir e incluso eliminar el fenómeno de histéresis si se repite el experimento para obtener el tramo A con la salvedad de que el lecho debe estar fluidizado recientemente.

Es importante recalcar que en la figura 3.1 existen dos tramos que están claramente diferenciados y que se exponen a continuación:

- **Lecho fijo.-** La pérdida de carga va creciendo linealmente a medida que se incrementa la velocidad del gas.
- **Lecho fluidizado.-** A partir de que se alcanza la fluidización del lecho, la pérdida de carga se mantiene constante y se iguala al peso por unidad de superficie de las partículas suspendidas.

Para poder determinar la pérdida de carga hay que considerar un lecho en el que se origina un gradiente de presión uniforme. La teoría elaborada por *Kozeny (1927)* y *Carman (1937)*, se basa en determinar la equivalencia entre el paso del flujo por los recovecos del lecho y el flujo de gas alrededor de una esfera que tenga una superficie y volumen equivalente.

Tal y como se explicó anteriormente los lechos que se fluidizan con un sistema gas-sólido, adquieren un comportamiento muy característico por la relación que existe entre la pérdida de carga en el interior del lecho y la velocidad superficial que tiene el gas. A continuación en la figura 3.2 se representa dicho comportamiento:

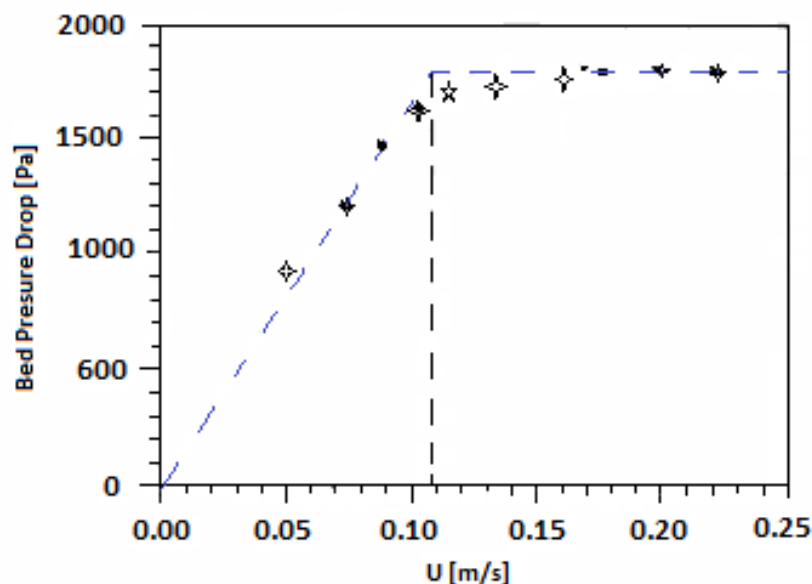


Figura 3.2: Pérdida de carga en el lecho en función de la velocidad superficial del gas. Derek Wilkinson (1995).

En la figura 3.2 se representa la pérdida de carga del lecho en función de la velocidad superficial del gas, lo cuál permite observar que a medida que va aumentando la velocidad superficial del gas, también se va incrementando de forma lineal la pérdida de carga en el lecho cuando se analiza el tramo de lecho fijo. El momento que se alcanza una velocidad superficial del gas en concreto, la pérdida de carga en el lecho ya deja de aumentar y permanece constante, a este estado se lo denomina **lecho fluidizado**. Además la velocidad a la que se obtiene el lecho fluidizado se denomina **velocidad de mínima fluidización**.

Es factible obtener experimentalmente la gráfica de la figura 3.2, haciendo que la instalación vaya de velocidades del gas altas hasta la velocidad de mínima fluidización y por consiguiente haciendo que el lecho se vaya defluidizando hasta que $U=0$. Una vez conseguido esto las medidas se toman en sentido descendente. Este método tiene como ventaja principal el que se puede obtener la velocidad mínima de fluidización simplemente realizando la medición de la pérdida de carga en el lecho y como consecuencia no hace falta tener conocimiento sobre las propiedades de las partículas. En contrapartida el mayor inconveniente es que existe la necesidad de defluidizar el lecho, lo cuál impide poder obtener la velocidad de mínima fluidización durante el experimento.

Por tanto se puede implementar este método midiendo la pérdida de carga producida en el lecho de partículas variando la velocidad superficial del gas. A partir de que se haya obtenido todas las mediciones se puede hacer una gráfica similar a la de la figura 3.2 y gracias a esto se puede determinar la velocidad mínima de fluidización.

La necesidad de tener que parar la operación para definir la velocidad de mínima fluidización, junto con la poca precisión que se tiene para determinar la zona de transición entre los dos estados (lecho fijo y lecho fluidizado), hacen que este método sea poco práctico.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LAS FLUCTUACIONES DE PRESIÓN

3.2.1 Fluctuaciones de presión

El método de las fluctuaciones de presión es de gran utilidad a la vez que muy utilizado, ya que es simple y muy fácil de implementar en aplicaciones industriales. Además permite obtener la suficiente información como para poder caracterizar el comportamiento o la dinámica de un lecho fluidizado sin cometer errores que se puedan considerar relevantes. Este método se suele separar en dos tipos de análisis: por un lado el que requiere de herramientas lineales en el dominio del tiempo, que es el caso de la desviación típica, y otro en el dominio de la frecuencia, que se refiere a la función de densidad espectral de potencia (PSD). Por otro lado está el análisis que requiere herramientas no lineales, haciendo el supuesto de que el comportamiento de un lecho fluidizado es de carácter caótico.



El fenómeno de las fluctuaciones de presión se debe a lo que les sucede a las burbujas que se forman en el interior del lecho. A continuación en la figura 3.3 se presenta esquemáticamente lo que le sucede a una burbuja debido a la distribución de presión que le rodea.

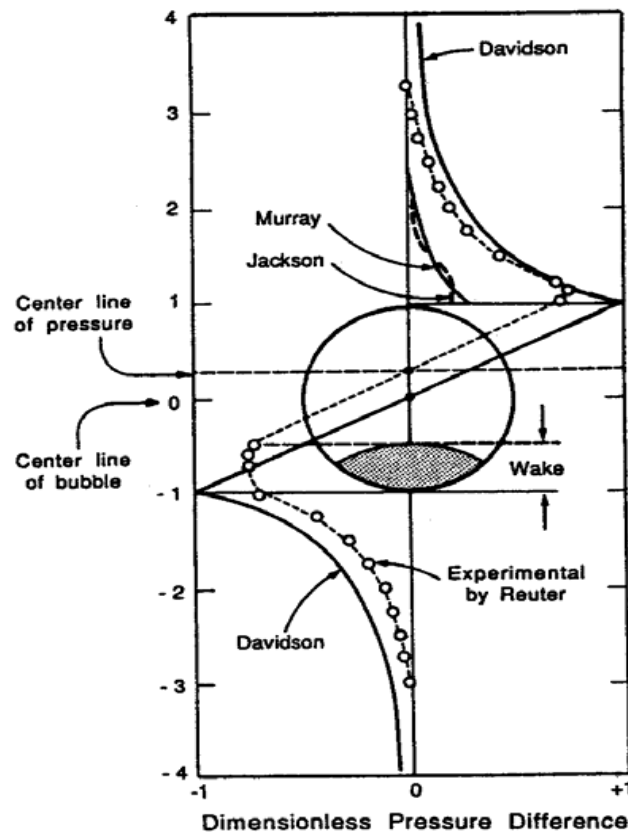


Figura 3.3: Representación en dos dimensiones de la distribución de presión alrededor de una burbuja aplicando el modelo de Davidson (1993) y comparación de la medida experimental de Router.

En la figura 3.3 se representa la distribución de presión en dos dimensiones que se produce alrededor de una burbuja a su paso por un punto del lecho fluido, así como los distintos perfiles de fluctuación de presión en forma adimensional. Davidson (1993) logró modelar los resultados experimentales gracias a que desarrolló una correlación en la que la presión aumenta o disminuye de forma cúbica en función del radio de la burbuja. Curiosamente también determinó que en la zona central del paso de la burbuja, la presión varía linealmente de un extremo a otro. Además se puede observar que el punto central de la línea de presión correspondiente a los valores experimentales está desplazado con respecto al punto central de la burbuja y esto se debe a que cuando la burbuja asciende, arrastra junto con ella una nube de partículas a causa de que la forma de dicha burbuja no es completamente esférica.

Una vez que se ha explicado el efecto de las burbujas sobre la señal de presión, se puede ver en la figura 3.6 un ejemplo de la señal que se recoge debido a estas fluctuaciones de presión.

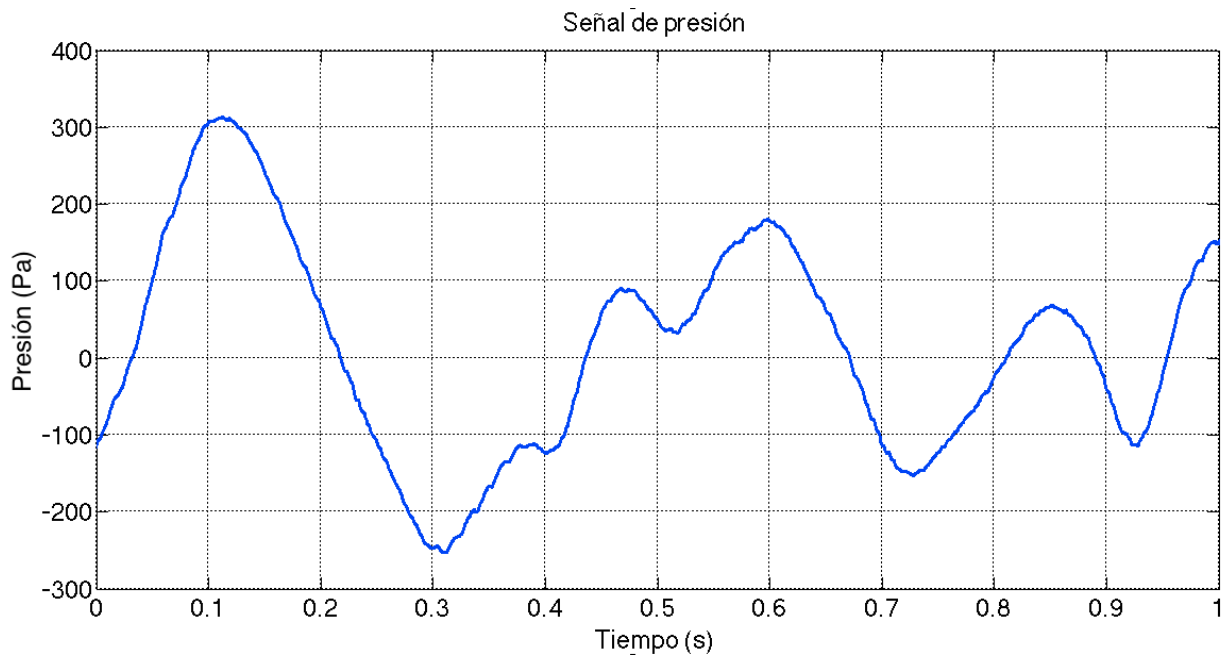


Figura 3.4: Señal de presión cuando el lecho está fluidizando con un caudal de 1100 l/min y sin que gire el distribuidor.

Para aplicar correctamente el método de las fluctuaciones de presión hay que tomar en cuenta que a la hora de realizar las mediciones con el equipo de laboratorio, se debe cumplir con el teorema de Nyquist.

3.2.1.1 Teorema de Nyquist

El sistema de adquisición de señales con el que se trabaja, lleva a cabo una digitalización de las señales que recibe gracias a la configuración que se realiza previamente antes de realizar las medidas. Hay que recalcar que la frecuencia de muestreo es factible de programarse antes de cada adquisición de datos.

Un factor de gran importancia, que se debe tener en cuenta para definir la configuración de la adquisición de datos, es el teorema de Nyquist, que sirve para establecer la mínima frecuencia a la que se debe realizar el muestreo, para garantizar que la reproducción digital de la señal de la adquisición de datos sea buena y no se pierda información. Como regla general, el Teorema de Nyquist, establece que la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo el doble de la frecuencia más alta contenida en la señal que se desea muestrear. Si el proceso llevado a cabo para la toma de datos no tiene en cuenta este teorema, es imposible asegurar que se analicen todas las frecuencias contenidas en la señal, por lo que es muy probable cometer errores a la hora de obtener resultados ya que se está perdiendo información en el momento que se hacen las mediciones. También existe la posibilidad de que se produzca el fenómeno llamado **'aliasing'** que no es otra cosa que la distorsión de la adquisición, dando lugar a la aparición de frecuencias que no existen en realidad. Según el teorema de Nyquist el muestreo se debería realizar como mínimo a una frecuencia de 400 Hz, y en este trabajo se ha realizado la adquisición de datos a una

frecuencia de 2000 Hz, por lo que se puede asegurar que en todas las mediciones se ha tenido la precaución de no perder información.

Es un error bastante frecuente creer que una misma señal muestreada con una tasa elevada se reconstruye mejor que una muestreada con una tasa inferior. El proceso de muestreo es desde un punto de vista matemático perfectamente reversible, esto quiere decir que su reconstrucción es exacta. Dicho de otra forma, desde el punto de vista matemático al que se refiere el teorema de Nyquist la reconstrucción de una señal de 10000 Hz es idéntica tanto si se obtiene de una tasa de muestreo de 25000 datos por segundo como si se hace con una muestra de 50000 datos por segundo, es decir que no aporta nada el incrementar la tasa de muestreo una vez que ésta cumple el criterio de Nyquist.

En resumen, el teorema de Nyquist demuestra que toda la información de una señal contenida en el intervalo temporal entre dos muestras cualesquiera está descrita por la serie total de muestras siempre que la señal registrada sea de naturaleza periódica (como es el caso del sonido) y no tenga componentes de frecuencia igual o superiores a la mitad de la tasa de muestreo.

Para llevara cabo la adquisición de datos y el tratamiento de las distintas señales es de gran utilidad usar filtros. En este trabajo el equipo de medida cuenta con filtros de paso bajo y filtros de paso alto, que no tienen otra función que eliminar ruido, en el caso del filtro de paso bajo deshecha el ruido que esté por debajo de una frecuencia de 0,16 Hz y en el caso del filtro paso alto elimina el ruido que esté por encima de 200 Hz. Todo el momento se trabaja en un rango de 0 a 10 Hz por lo que el ruido que se elimina no afecta en nada a las mediciones ni al tratamiento de las señales ya que estos ruidos se pueden deber al funcionamiento de la red de aire comprimido de la universidad o a la vibración causada por el constante movimiento de las partículas en el lecho.

3.2.2 Desviación típica

Existe la posibilidad de obtener la U_{mf} de manera experimental sin necesidad de interrupciones en el proceso mediante el uso de la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

Se realizan una gran cantidad de mediciones, de presión por ejemplo que se guardan para su posterior tratamiento en MATLAB. Durante el análisis de estas señales en el dominio del tiempo, es necesario cuantificar la variación o fluctuación de la presión que se produce a lo largo de toda la adquisición de datos. Es decir que es necesario establecer un valor numérico que permita cuantificar dicha fluctuación de presión. Para esto se hace uso de la desviación típica.

La desviación típica o desviación estándar (σ) es una medida de dispersión que indica cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio de una distribución. El cuadrado de la desviación típica es el promedio del cuadrado de la distancia de cada



punto respecto de la media aritmética. El cálculo de la desviación típica es de gran utilidad para poder establecer el instante en el que se inicia la fluidización (*Johnsson, 2000*), dicho de otra forma la desviación típica permite también calcular la **velocidad mínima de fluidización**. Además hay que decir que la desviación típica es un parámetro de varios que utiliza MATLAB, para poder calcular la **PSD (Power Spectral Density)** o también llamada **DEP (Densidad espectral de potencia)**.

3.2.3 Determinación de la velocidad mínima de fluidización

En el año de 1974 los científicos Verloop y Herejes utilizaron por primera vez el estudio de las fluctuaciones de presión en los lechos fluidos. En el año de 1985 Puncochar descubrió la forma de obtener la velocidad mínima de fluidización en condiciones de operación utilizando la media de las fluctuaciones de presión. Por tanto se pudo obtener U_{mf} sin la necesidad de defluidizar el lecho, además tampoco es necesario conocer las características de las partículas sólidas que forman el lecho.

Si se realizan análisis de las fluctuaciones de presión que se originan en el seno del lecho, se puede observar que la desviación típica de dichas fluctuaciones es función casi lineal de la velocidad superficial del gas (*Puncochar 1985*):

$$\sigma_p = A + BU \quad (3)$$

Donde A es una constante, B es la pendiente de la recta y U es la velocidad superficial del gas. Las fluctuaciones de presión en el interior de un lecho se originan por varios motivos como pueden ser: la creación de burbujas, el ascenso de dichas burbujas a través del lecho y su explosión cuando llegan a la superficie. Por lo que en el caso de partículas clasificadas como de tipo B y D según la tipología de *Geldart (1973)* en las que la velocidad mínima de fluidización coincide con la velocidad de mínimo burbujeo es factible determinar la velocidad de mínima fluidización como la velocidad del gas a la cual la desviación típica de las fluctuaciones de presión es mayor de cero, dicho de otra forma es la velocidad a la que comienzan a aparecer las burbujas y por consiguiente las fluctuaciones de presión.

Por tanto si $\sigma_p = 0$, entonces se puede determinar de la ecuación (3) que:

$$U_{mf} = -\frac{A}{B} \quad (4)$$

Se puede realizar un análisis del método desde el punto de vista de “La energía mecánica del movimiento vibratorio de partículas”. La energía mecánica media de las partículas en un lecho de volumen unidad a una velocidad superficial del gas que está por encima de la de mínima fluidización se expresa de la siguiente manera:

$$\bar{E}(U) = \bar{E}(U_{mf}) + W \quad (5)$$

Donde W representa la contribución de la energía debida a las heterogeneidades del movimiento fluido. *Furukawa y Ohmae (1958)*, fueron capaces de determinar que la



energía mecánica media de las partículas es proporcional a la velocidad superficial del gas:

$$\bar{E}(U) = k_1 \cdot U \quad (6)$$

Donde k_1 representa un parámetro que está ligado a las propiedades de las partículas y a la temperatura a la que se está trabajando. En el caso en que haya estados en los que todas las partículas se mueven en fase con el fluido y viceversa, y por ende a la misma frecuencia es admisible hacer el supuesto de que la energía causada por las irregularidades depende de la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

$$W = k_2 \sigma_p \quad (7)$$

Siendo k_2 otro parámetro que depende de las condiciones de operación.

Trabajando con las ecuaciones (5), (6), (7) se consigue una interpretación física de la ecuación (3):

$$k_1 \cdot U = k_1 \cdot U_{mf} + k_2 \cdot \sigma_p; \quad \sigma_p = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} + \frac{k_1}{k_2} U \quad \left\{ \begin{array}{l} A = -\frac{k_1}{k_2} U_{mf} \\ B = \frac{k_1}{k_2} \end{array} \right.$$

Es claramente apreciable que los parámetros que intervienen en la relación lineal de la velocidad superficial del gas y la desviación típica referente a las fluctuaciones de presión están ligadas directamente a las condiciones de operación y a las características de las partículas que conforman el lecho.

A partir de que *Puncochar (1985)* fue capaz de determinar la velocidad de mínima fluidización mediante el uso de un lecho fluido de geometría circular provisto de un distribuidor con orificios de 0,8 mm de diámetro y un área libre del 2%, una infinidad de investigadores han confirmado el método al aplicarlo en diferentes configuraciones de lechos. Una vez que se verificó que el método arroja resultados valiosos, los estudios se han enfocado principalmente en dos aspectos:

1. Obtener el número mínimo de medidas de presión requeridas para conseguir valores de desviación estándar que se consideren aceptables.
2. Autenticidad de la recopilación de medidas de presión en el plenum con el objetivo de sortear posibles problemas físicos como por ejemplo la obstrucción o erosión de las sondas.

A lo largo de las investigaciones se ha trabajado con diferentes tamaños de muestras sobre lechos con semejantes condiciones de operación, y así se determinó un tamaño mínimo de la muestra para lograr que los resultados de un ensayo sean dados por válidos. Según el estudio realizado por *Wilkinson (1995)* se determinó que como mínimo se deben tener 10000 datos o muestras para asegurar la fiabilidad del análisis y que es factible y además recomendable realizar las mediciones en el plenum.



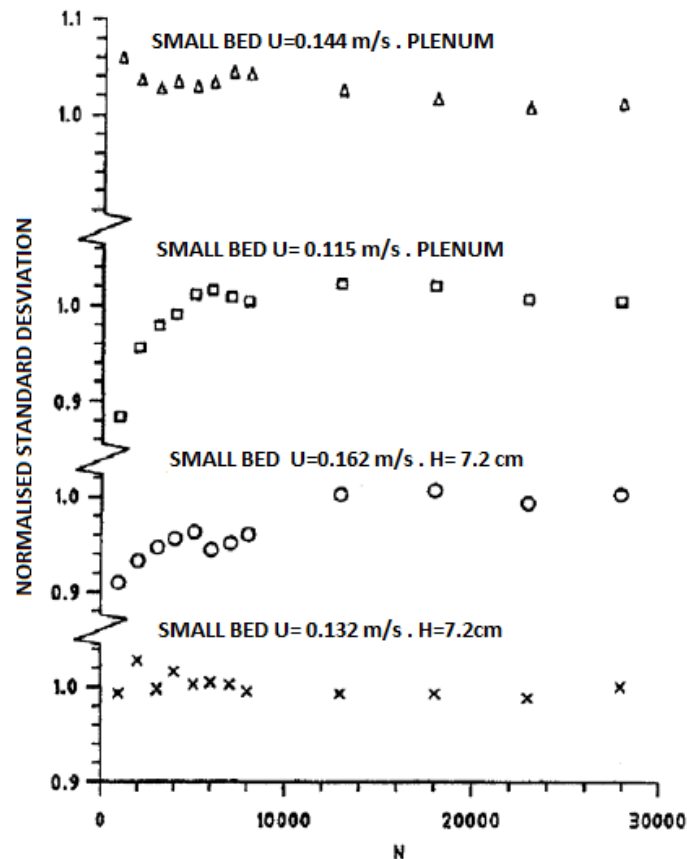


Figura 3.5: Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función del número de medidas en un lecho a pequeña escala. Derek Wilkinso (1995).

La figura 3.5 muestra el efecto que causa el incremento del número de medidas en la desviación estándar para dos localizaciones diferentes, aquí se puede apreciar que hasta 1000 medidas el resultado que se obtiene puede variar de manera significativa con respecto al valor adquirido con series mayores. En caso de tener muestras de más de 10000 valores, la variación que se apreciará entre las medias es aproximadamente de $\pm 2\%$. Por consiguiente, de acuerdo a los experimentos efectuados al respecto, se debe tomar como mínimo muestras de 10000 datos para poder asegurar la fiabilidad de éste método.

Además los experimentos que se han llevado a cabo confirman que la toma de medidas de las fluctuaciones de presión se pueden realizar en el plenum. En la figura 3.6 se exponen los resultados que se obtuvieron por Derek Wilkinson (1995) para distintos puntos en el lecho. Se puede apreciar claramente que la medida de presión en el plenum ofrece resultados similares a los que se obtendrían si se realiza las mediciones en puntos situados en el interior del lecho. El realizar las medidas en el plenum se debe a que de esa forma se evita problemas de desgaste debido a la fricción de las partículas y obstrucciones en las sondas de presión.

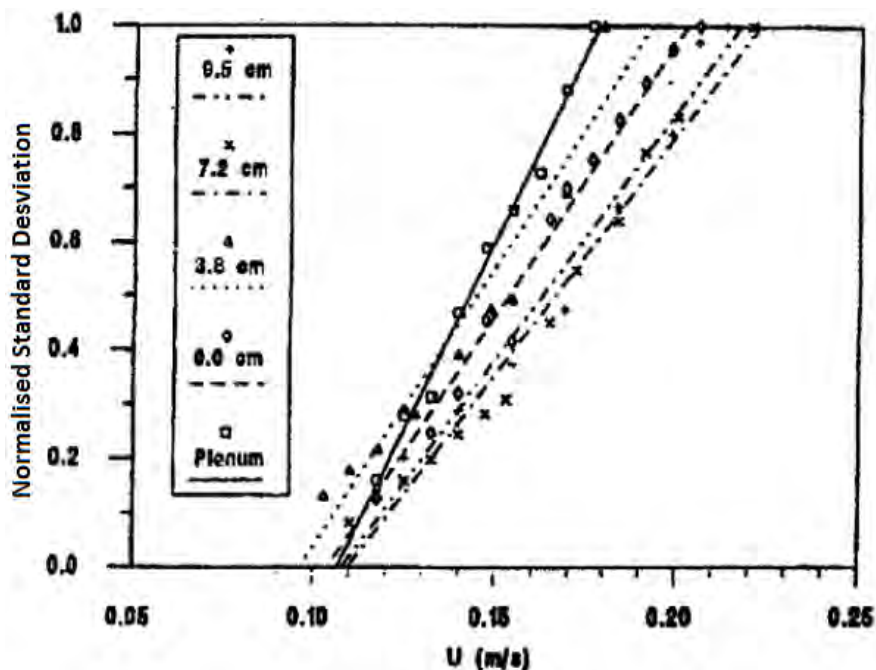


Figura 3.6: Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función del número de medidas en función del número de medidas en un lecho a pequeña escala. Derek Wilkinson (1995).

3.3 FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO

El análisis de las series temporales de las fluctuaciones de presión se utilizan en infinidad de análisis de sistemas hidrodinámicos desde hace unas cuantas décadas. El análisis espectral es una herramienta de potente alcance para el estudio de la presión. **La densidad espectral de potencia (DEP)** denominada en la literatura convencional como **“PSD”** ofrece una información detallada sobre todo lo que tiene que ver con los fenómenos que aparecen en el interior del lecho hasta el punto que se puede realizar una caracterización óptima del mencionado lecho. Se sabe que hay una cierta dificultad en el momento de determinar la medida de presión dinámica ya que existen numerosas razones por las que se producen las fluctuaciones de presión en el lecho. Las fluctuaciones de presión son una superposición de fluctuaciones locales debidas al movimiento de las burbujas durante su ascenso a lo largo del lecho. Por tanto las ondas de presión se trasladan a lo largo del lecho en ambas direcciones desde su punto de origen y como resultado de esto dichas fluctuaciones de presión son factibles de medir en el plenum del lecho.

Basándose en las fluctuaciones de presión que se midieron para aplicar el método que se estudió en el punto anterior es factible obtener la frecuencia característica del lecho y por consiguiente la frecuencia a la que ocurren los principales fenómenos. Para esto se debe aplicar el desarrollo de Fourier que se refiere a las series medidas y de esta forma se puede obtener las frecuencias de muestreo del lecho.

3.4 ESPECTROGRAMAS

El espectrograma es el resultado de calcular **el espectro de frecuencias** de tramos enventanados de una señal. El resultado es una grafica en tres dimensiones que representa la energía del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo.

3.4.1 El espectro de frecuencias

El espectro de frecuencias se caracteriza por la distribución de amplitudes para cada frecuencia de un fenómeno ondulatorio (sonoro, luminoso o electromagnético) que sea superposición de ondas de varias frecuencias. También se llama espectro de frecuencias al gráfico de intensidad frente a la frecuencia de una onda particular.

El espectro de frecuencias o descomposición espectral de frecuencias puede aplicarse a cualquier concepto relacionado con frecuencia o movimientos ondulatorios como son por ejemplo los colores, las notas musicales, las ondas electromagnéticas de radio o televisión e incluso la rotación regular de la tierra.

El ruido blanco o sonido blanco es una señal aleatoria que se caracteriza por el hecho de que sus valores de señal en dos tiempos diferentes no guardan correlación estadística. Como consecuencia de ello, su densidad espectral de potencia (PSD) es una constante, es decir, su gráfica es plana. Esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas muestran la misma potencia. Dado que la luz blanca es aquella que contiene todas las frecuencias del espectro visible, el ruido blanco deriva su nombre de contener también todas las frecuencias.

De manera similar, una fuente de ondas sonoras puede ser una superposición de frecuencias diferentes. Cada frecuencia estimula una parte diferente del oído, por lo que si una persona escucha una onda sonora con una sola frecuencia predominante es capaz de escuchar una nota, pero en cambio un silbido o un golpe repentino contienen frecuencias dentro de todo el rango audible.

Cada estación de radio o televisión es una fuente de ondas electromagnéticas que emiten ondas cercanas a una frecuencia dada. En general las frecuencias se concentrarán en una banda alrededor de la frecuencia nominal de la estación, a esta banda es a lo que se le denomina como canal. Una antena receptora de radio condensa diferentes ondas electromagnéticas en una única señal de amplitud de voltaje, que puede ser a su vez decodificada nuevamente en una señal de amplitud sonora, que es el sonido que se escucha cuando se enciende una radio. El sintonizador de la radio selecciona el canal de un modo similar a como los receptores del oído humano seleccionan una determinada nota. Si se hace un gráfico de la intensidad de canal respecto a su frecuencia se obtiene el espectro electromagnético de la señal receptora.



A continuación se presenta un ejemplo del espectrograma cuando se trabajó con el lecho seco fluidizando con un caudal de 1100 l/min sin que gire el distribuidor.

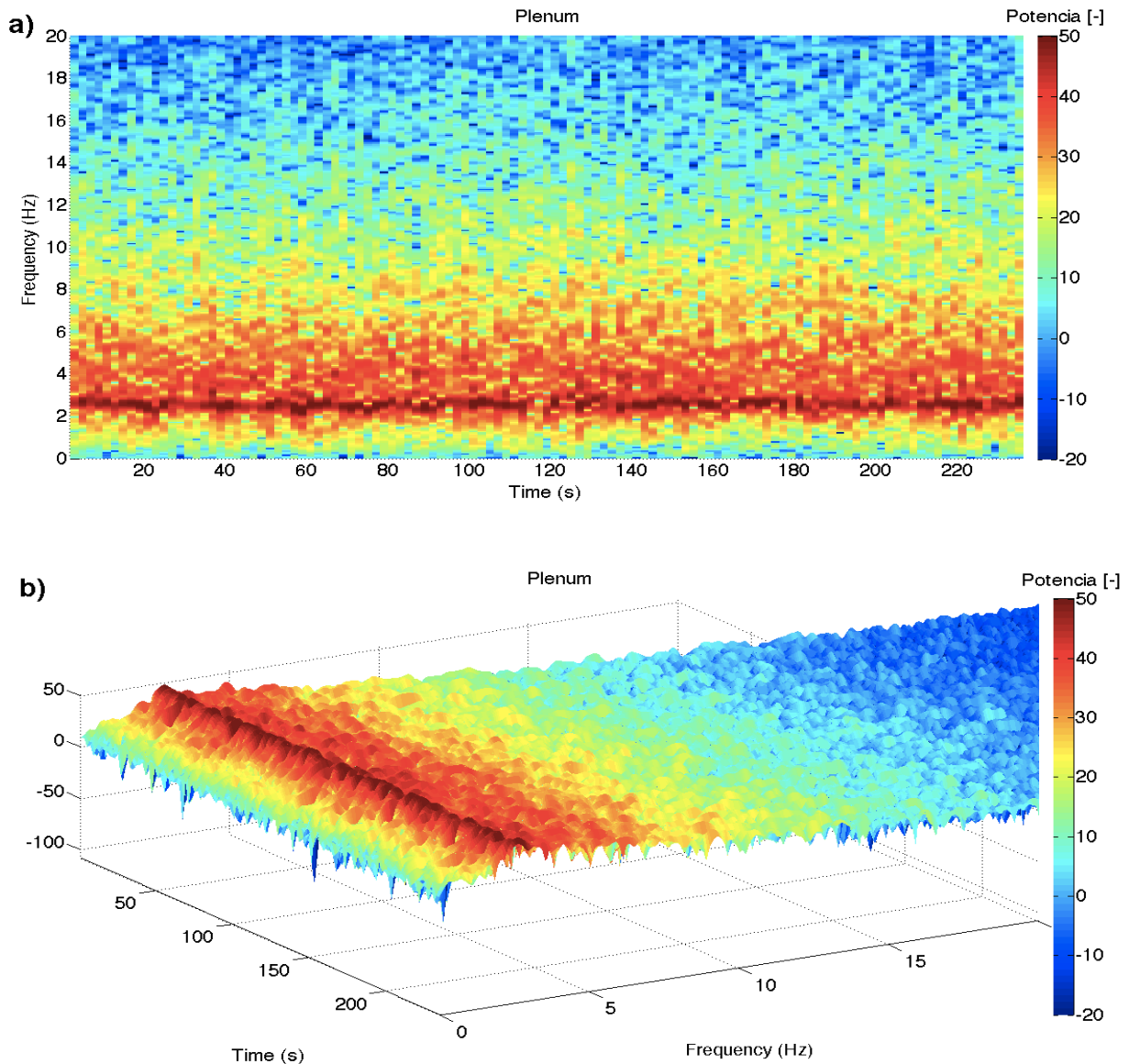


Figura 3.6: Vista en 2D y 3D del espectrograma en el plenum del lecho seco fluidizando con un caudal de 1100 l/min con el distribuidor estático (sin giro).

En la figura 3.6 se puede apreciar un espectrograma que no es otra cosa que un análisis de la señal de presión en el dominio de la frecuencia, con esto se puede determinar la frecuencia característica del lecho que en este caso debido a su geometría, sus dimensiones y sus condiciones de funcionamiento es aproximadamente de unos 2 Hz, con esto se llega a caracterizar el comportamiento de este lecho en particular. Además se puede apreciar que hay un tercer eje que tiene su escala en colores de tal forma que el color rojo representa la potencia más alta y el azul la potencia más baja, que se producen debido a las fluctuaciones de presión, donde la potencia más alta coincide con la frecuencia característica de 2 Hz.

CAPÍTULO 4: INSTALACIÓN

Todas las mediciones se llevan a cabo en el laboratorio del departamento de ingeniería Térmica y de Fluidos, de la Universidad Carlos III de Madrid. La instalación consta de un lecho a escala en cuyo interior se depositan partículas de arena que se pondrán en movimiento gracias al caudal de aire que ingresa en el lecho por su parte inferior mediante un distribuidor que está ubicado entre el lecho y el plenum (o cámara de remanso). La tubería desde donde viene el caudal de aire está equipada de una válvula reguladora. Además el distribuidor está conectado a un motor eléctrico con el objetivo de que este gire en el plano horizontal a una velocidad deseada para que las partículas de arena se muevan y se mezclen con mayor facilidad. Las mediciones se han realizado con el motor parado y con el motor funcionando a 50 rev/min y a 100 rev/min, con el objetivo de comparar los resultados y observar como afecta a la fluidización.

Para realizar las mediciones, el lecho está conectado permanentemente a un equipo de control y medición que a su vez volcará los datos en un ordenador mediante un programa informático. Dichos datos posteriormente son analizados y tratados mediante el programa MATLAB y así finalmente se puede obtener conclusiones que permiten caracterizar el comportamiento del lecho.

A continuación se presenta un esquema de la instalación donde se ha realizado las mediciones:



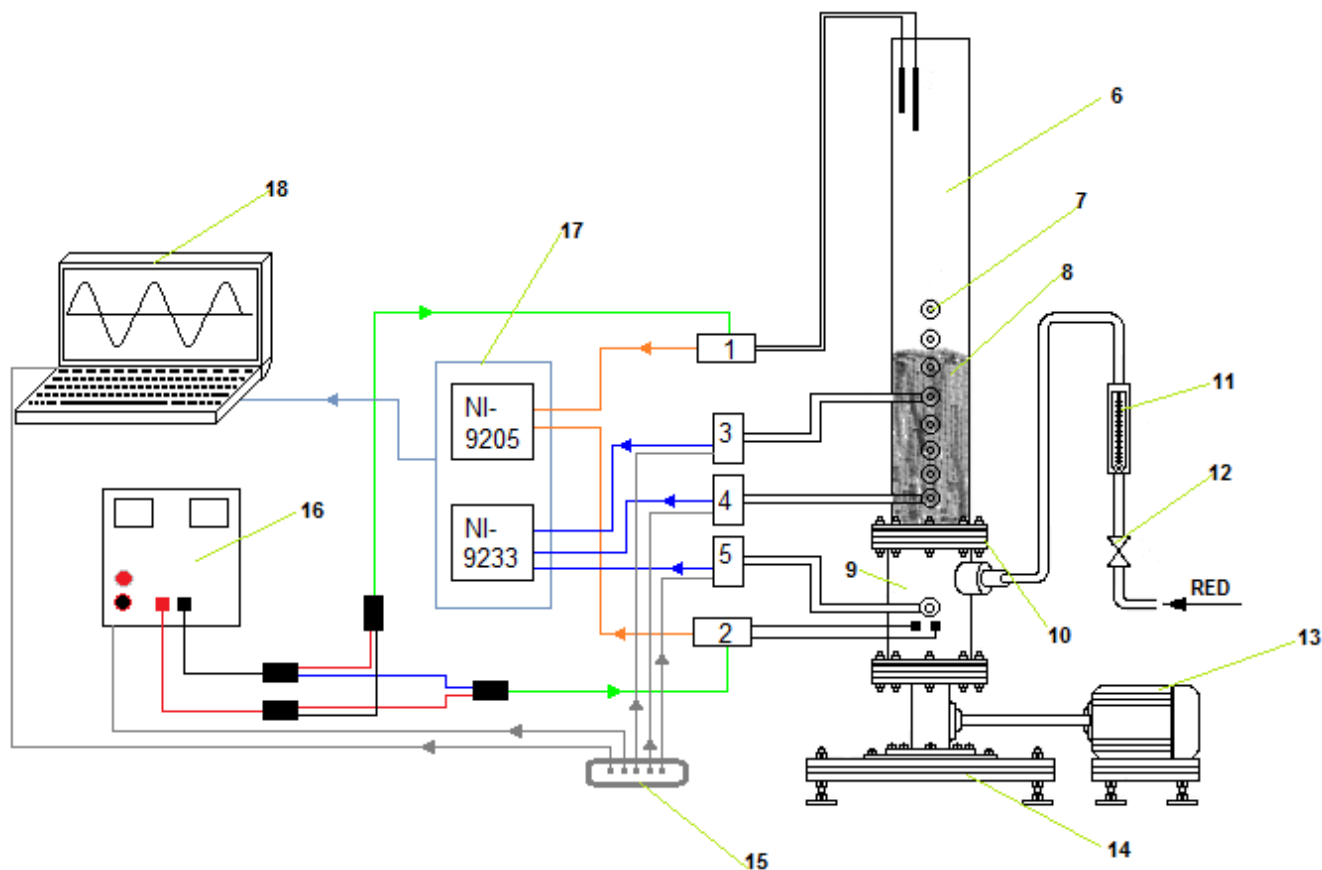


Figura 4.1: Esquema de la instalación. 1. Sensor de temperatura y humedad relativa de la columna, 2. Sensor de temperatura y humedad relativa del plenum, 3, 4 y 5 son transductores de presión, 6. Columna, 7. Conectores de presión, 8. Partículas de arena, 9. Plenum, 10. Distribuidor, 11. Rotámetro, 12. Válvula reguladora de caudal, 13. Motor eléctrico, 14. Plataforma de sustentación, 15. Fuente de energía eléctrica, 16 Fuente de alimentación, 17. Bastidor NI-cDAQ-9172 donde se conectan las tarjetas de almacenamiento de datos NI-9205 y NI-9233, 18. Ordenador.

Para exponer al detalle todo el equipo utilizado y que sea de fácil comprensión cuál es la función de cada componente se ha dividido la instalación en tres partes, como se expone a continuación:

- **El lecho:** en cuyo interior se producirá la fluidización, está compuesto por una columna que es un tubo de metacrilato, tomas para sensores, plenum o cámara de remanso, distribuidor y motor eléctrico para hacer rotar al distribuidor. Se debe asegurar que sea robusto, estático y bien nivelado para evitar errores y vibraciones el momento de realizar las mediciones.
- **Fluido de trabajo y partículas sólidas:** el sistema con el que se trabaja es de tipo gas-sólido, cuyo fluido es aire y las partículas sólidas son arena de sílice, que según la clasificación de Geldart son de tipo B.
- **Equipo de medida y adquisición de datos:** tanto en la columna del lecho como en el plenum se encuentran dispuestas varias sondas de presión que miden las

fluctuaciones de presión, que a continuación, mediante unos transductores de presión transforman estas fluctuaciones en señales de tensión, las cuales son transferidas por medio de una tarjeta de adquisición de datos a un ordenador donde serán almacenadas para su posterior tratamiento y análisis mediante el programa informático MATLAB.

A continuación se describe los componentes y se facilita información técnica sobre las tres partes en las que se ha dividido a la instalación.

4.1 EL LECHO

El orden en el que se detallan los componentes del lecho se hace de acuerdo al orden en el que el aire los va atravesando.

- **Plenum:** Es la parte inferior del lecho por donde se introduce el aire, cuya dirección de recorrido es perpendicular a la cama de arena. Este plenum sirve como una cámara cilíndrica de remanso donde se estabiliza el gas, está fabricado de PVC y su diámetro interior es de 19 cm y tiene una altura de 42 cm. Su parte inferior está anclada a una plataforma base que sujeta a todo el lecho. En su interior alberga un eje que está conectado en su extremo inferior a un motor eléctrico que es el encargado de transmitir giro al eje, con el objetivo de que éste haga girar al distribuidor para mejorar la mezcla de las partículas. En la pared del plenum existe una toma por donde entra el gas y varias tomas para sensores de presión, temperatura y humedad relativa.
- **El distribuidor:** es el siguiente componente por el que atraviesa el aire y tiene como función hacer que en lo posible el gas esté bien distribuido dentro del lecho, lo que se consigue mediante un disco circular provisto de orificios por medio de los cuales se consigue que el aire se reparta uniformemente por todo el lecho. El disco es de aluminio de 0,5 cm de espesor, un diámetro de 19 cm, con un área abierta del 3% y con agujeros distribuidos con una disposición triangular con 11 mm de lado. La cara del distribuidor que está en contacto con el plenum tiene adherida una malla metálica de 400 μm para evitar que se introduzcan partículas en el plenum. El distribuidor está sujeto en todo momento por dos bridas.
- **La columna:** una vez que el fluido de trabajo pasa por el distribuidor, llega a la columna donde están albergadas las partículas de arena. Es aquí donde se producirá la fluidización, tal y como se detalló en el capítulo 2 de este documento. El material del que está fabricada la columna es metacrilato transparente de 0,19 m de diámetro interior, 0,5 cm de espesor y 82,5 cm de altura, la cual es suficiente para evitar que algunas partículas puedan ser expulsadas fuera del lecho. En su pared están instaladas las sondas de presión a diferentes alturas, en este caso se mide la presión a una altura de 7,25 cm y 14,5 cm. Todos los experimentos se llevan a cabo sin que la



parte superior de la columna esté cubierta por lo que se puede asegurar que las condiciones de operación son a presión y temperatura ambiente.

La columna y el plenum están unidos gracias a que los dos elementos están dotados de unas bridas de iguales dimensiones. En la zona donde están las bridas se encuentra ubicado el distribuidor y es donde se juntan todos los elementos en bloque, cuya fijación es gracias a unos tornillos pasantes. Las bridas y los discos que conforman el distribuidor están sellados con juntas de polímero para impedir que se produzcan fugas de aire.

Todo el bloque se mantiene sujeto y firme gracias a que está anclado por la parte inferior del plenum a una base cuadrada de aluminio de 0,60 m.

4.2 FLUIDO DE TRABAJO Y PARTÍCULAS SÓLIDAS

4.2.1 Características del fluido de trabajo

El fluido que se utiliza para el experimento es el aire como se ha mencionado con anterioridad, el cuál proviene de la red de aire comprimido de la Universidad. El caudal con el que se trabaja es variable, por lo que la instalación está dotada de un rotámetro cuya función es regular el caudal dentro de un rango de 0 a 1400 l/min. Además se cuenta con una llave de paso general que permite aislar por completo la instalación. Las propiedades físicas del aire con el que se trabaja son: $\rho = 1,2036 \text{ Kg/m}^3$ y una humedad relativa de entre 8 y 10 %.

4.2.2 Características de las partículas

En este estudio las partículas sólidas con las que se trabaja son de arena de sílice, que generalmente se le conoce con el nombre de arena de río. Estas partículas se encuentran dentro de la clasificación de Geldart como catalogadas de tipo B y por tanto su principal característica es que al principio de la fluidización aparece el burbujeo, por lo que se aprecia una limitada expansión del lecho y una ausencia de chorros así como un crecimiento de la burbuja delimitado por el diámetro de la columna. En este caso es complicado definir con precisión el tamaño de las partículas ya que existe una cierta dispersión, pero no hace falta calcularlo ya que en el laboratorio se ha determinado previamente que el diámetro medio de las partículas es de $693 \mu\text{m}$ y su densidad es $\rho = 2645 \text{ Kg/m}^3$.

4.3 EQUIPO DE MEDIDA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Existe la necesidad imperiosa de realizar una cantidad enorme de mediciones así como su respectivo registro en una base de datos, por lo que es de vital importancia contar con un equipo capaz de realizar estas funciones. Por tanto la herramienta más indicada para esta tarea es un ordenador portátil que cuenta con una tarjeta de



adquisición de datos.

Las fluctuaciones de presión, temperatura y humedad relativa son registrados por los diferentes sensores que están dispuestos a lo largo de la columna del lecho y el plenum y posteriormente son convertidos en una señal de tensión a través de sendos transductores de señal con los que cuenta la instalación. Estas señales son recogidas y convertidas digitalmente gracias a una tarjeta de adquisición de datos.

El manejo y control de las tarjetas se lleva a cabo mediante un software desarrollado por el departamento de Ingeniería Térmica y de fluidos llamado **UC3MDAQ2010.V04.Vi** que reconoce y permite realizar la lectura y recogida de datos.

4.3.1 Sondas de presión

Las sondas de presión con las que está equipado la columna del lecho y el plenum están constituidas por un tubo de acero inoxidable de 2mm de diámetro interior ensamblado sobre un racor de ¼ de pulgada. El correcto montaje de las sondas tiene que asegurar que en la cara interior de la pared ya sea de la columna o del plenum no se debe apreciar ningún tipo de relieve de material ya que esto puede afectar al desarrollo del experimento. Para evitar la obstrucción de las sondas o el posible paso de alguna partícula hacia el interior del circuito de aire comprimido, las sondas están equipadas con unas finas mallas que funcionan como filtros de impurezas. Las sondas están conectadas a los transductores mediante tubos de silicona de 4mm de diámetro interior.

4.3.2 Transductores de presión

Los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica que será la que se utiliza en los diferentes equipos de adquisición de datos. Los rangos de medida son muy amplios y pueden ir desde milésimas de bar hasta miles de bares.

Para cubrir los diferentes rangos de medida, precisión y protección se dispone de una gran variedad de transductores de presión fabricados con diferentes tecnologías que permiten cubrir todas sus necesidades, en este caso se utiliza los transductores de la marca KISTLER, modelo 5015. A continuación se hace una descripción de estos dispositivos:

Este instrumento hace uso de la tecnología piezoeléctrica para medir magnitudes mecánicas. Los sensores piezoeléctricos producen una carga eléctrica que varía en proporción directa a la carga que actúa sobre el sensor.

El Tipo 5015 no es sólo es un amplificador de carga sino también un medidor de carga universal con una pantalla de cristal líquido gráfica. Sin embargo, el módulo de bastidor de 19" también es adecuado para mediciones en un entorno industrial. Se puede mostrar al instante, valores pico y promedio, así como desviaciones de referencia.





Figura 4.2 Transductor de presión Kistler

A continuación se presenta un esquema detallado de lo que se puede visualizar en la pantalla del transductor de presión Kistler:



Figura 4.3: Pantalla del transductor de presión Kistler

Su tecnología es de las más avanzadas, por lo que permite eliminar casi por completo las interferencias de origen natural. Este instrumento se distingue en primer lugar por sus excelentes datos técnicos y en segundo lugar por su operación extremadamente simple, está provisto de:

- Amplificador de carga monocanal.
- Entrada Piezotron (opcional).
- Medida-salto compensado.
- Pantalla de cristal líquido (128x128 píxeles).
- La operación con menús.
- Evaluación de la señal directa.
- Ajuste flexible de filtros de paso alto y de paso bajo.
- Compatible con amplificador de carga tipo 5011B.
- Software para PC y Controladores de Instrumentos Virtuales para LabVIEW™.

4.3.3 Sensores de temperatura y humedad relativa EE33-MFTJ

En este caso se usan dos transductores que miden temperatura y humedad relativa, tanto en la columna del lecho como en el plenum. Estos transductores son de la serie EE33-MFTJ de alta precisión y están diseñados para realizar mediciones rápidas y fiables de la temperatura del punto de humedad relativa / rocío / humedad absoluta en las condiciones más exigentes.

Ni condensación ni contaminaciones químicas fuertes afectan a las medidas que son obtenidas de forma rápida y fiable. Presiones de proceso de hasta 100 bares (1450 psi) y una alta humedad tampoco son un problema para la serie EE33.

El núcleo de la serie EE33 es el nuevo tipo de célula de medición HMC1 monolítico, fabricado en tecnología de película delgada por E+E Elektronik.

La contaminación química y la condensación en realidad se evaporan debido al diseño de la célula de medición HMC1. La construcción monolítica del sensor permite un rápido retorno a las condiciones normales y una continuación de la medición. Además, el sensor de E+E posee un recubrimiento de la célula de medición HMC1, lo cual hace posible una mejor protección contra los suelos conductivos y corrosivos que pueden causar cortocircuitos.

Existen Modelos distintivos y versiones de montaje que permiten que la serie EE33 sea utilizada en numerosas aplicaciones:

- Medición de la humedad relativa durante la condensación temporal.
- Medición de la temperatura del punto de rocío de alta humedad.
- Medición de la humedad relativa a una alta humedad: la célula de medición se controla y se calienta de forma continua.
- Medición de la humedad relativa a la exposición química elevada y la humedad media.
- La medición de la humedad relativa a la presión del proceso hasta 100bar (1450psi) y humedad media.





Figura 4.4: Sensores de temperatura y humedad relativa EE-MFTJ

Algunas de las aplicaciones más típicas se dan en la industria farmacéutica y de alimentos, en secadores para cerámica, madera, hormigón, poliéster, etc., en granjas de setas, trasteros con alta humedad, cámaras de curado.

A continuación se presenta un esquema y las características principales del modelo EE33-MFTJ.

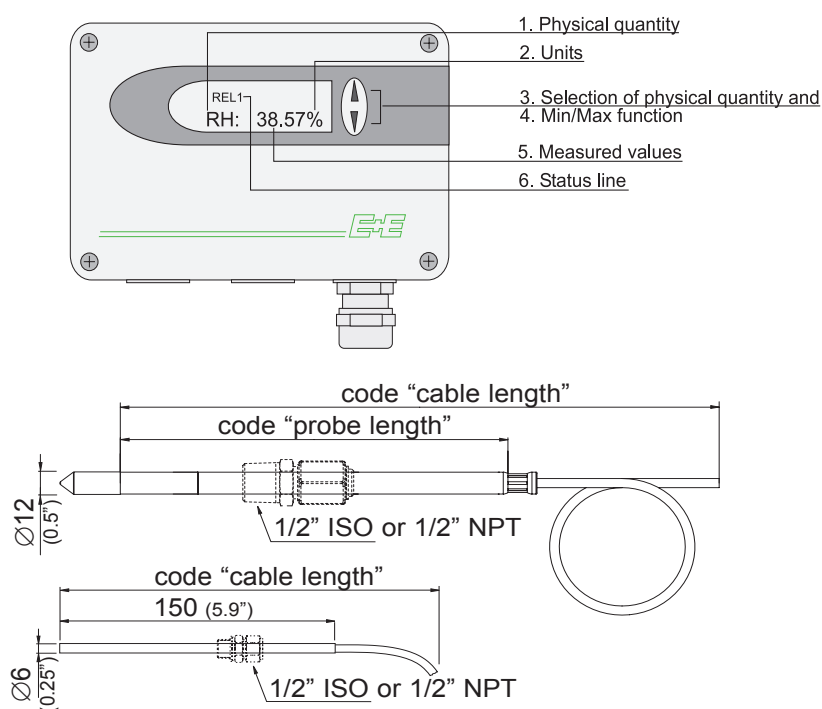


Figura 4.5: Esquema del sensor de temperatura y humedad relativa EE33-MFTJ

FUNCIONES	COMENTARIO
Medición de la humedad y de la temperatura	OK
Cálculo h, r, dv, Tw, Td, Tf, e	OK
2 salidas analógicas libremente escalables y configurables	OK
Sonda de teledetección de hasta 20 metros (65.6ft)	OK
Ajuste en las instalaciones de la humedad relativa y la temperatura	OK
Indicador LED de diagnóstico del transmisor de estado / error de sondas	OK
RS232 para la configuración del transmisor a través de PC	OK
software de configuración	OK
pantalla alterna con indicación MIN / MAX	opcional
2 salidas de alarma de libre configuración	opcional
Sonda detectora extraíble	opcional
Protección del sensor con recubrimiento	opcional
Conexiones eléctricas enchufables	opcional
La salida de datos a través de interfaz RS232	OK
La salida de datos a través de interfaz RS485	opcional
Red de hasta 32 transmisores vía bus RS485	opcional
Interfaz Ethernet para redes y monitoreo remoto	opcional
El registro de datos y software de análisis de PC	opcional

Figura 4.6: Tabla de especificaciones del sensor de temperatura y humedad relativa EE33-MFTJ



4.3.4 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos es la que se encarga de convertir las señales de tensión que emiten los transductores en señales digitales para su almacenamiento y posterior análisis en el ordenador portátil.

Para recopilar y almacenar la información en este caso se hace uso de dos tarjetas de adquisición de datos de la marca **National Instruments** modelos 9233 y 9205. Ambas tarjetas están conectadas a un bastidor que pertenece a la misma marca, modelo NI-cDAQ-9172, dicho bastidor tiene como funciones proveer de energía a las tarjetas y transmitir las señales hacia el ordenador portátil mediante un cable USB.

El modelo 9233 se encarga de recopilar los datos de presión tanto en la columna del lecho como en el plenum durante periodos de 4 minutos de duración, mientras que el modelo 9205 tiene como misión el almacenar los datos referentes a la temperatura y a la humedad relativa también en la columna y en el plenum durante el mismo período de tiempo. Los datos se van almacenando en las dos tarjetas simultáneamente de tal forma que se pueden ir guardando en una carpeta que previamente se ha creado, con el objetivo de obtener una base de datos que posteriormente se tratarán con el programa informático de MATLAB.

El periodo de tiempo se puede establecer previamente a las mediciones pero se eligió que sea de 4 minutos ya que experimentalmente se observó que es un tiempo suficiente para describir la dinámica del lecho.

A continuación se presenta una breve información técnica del bastidor NI-cDAQ-9172 y de las tarjetas NI-9233 y NI-9205.

4.3.4.1 Bastidor NI-cDAQ-9172

El sistema cDAQ consta de tres partes: módulos de la Serie C de I/O, el módulo de interfaz cDAQ y el USB-STC2. Estos componentes digitalizan señales, realizan conversiones Digital / Analógico para generar señales de salida analógicas, medición y control de señales I/O, y proporcionar acondicionamiento de señal.

El NI-cDAQ-9172 es un chasis de ocho ranuras, que puede contener hasta ocho módulos de serie C de I/O, puede operar en un rango de 11 a 30 VDC e incluye un convertidor de corriente AC/DC. Además, es un dispositivo compatible con puertos USB 2.0 y que incluye un cable USB de 1,8 m. El chasis NI-cDAQ-9172 tiene incorporado dos chips de 32 bits que hacen las funciones de contador y temporizador. Con un módulo de I/O digital instalado en la ranura 5 o 6 del chasis, se puede acceder a toda la funcionalidad del chip contador/temporizador incluyendo la cuenta de eventos, la generación de la onda de pulso o la medición, y codificadores de cuadratura.





Figura 4.7: Chasis NI-cDAQ-9172

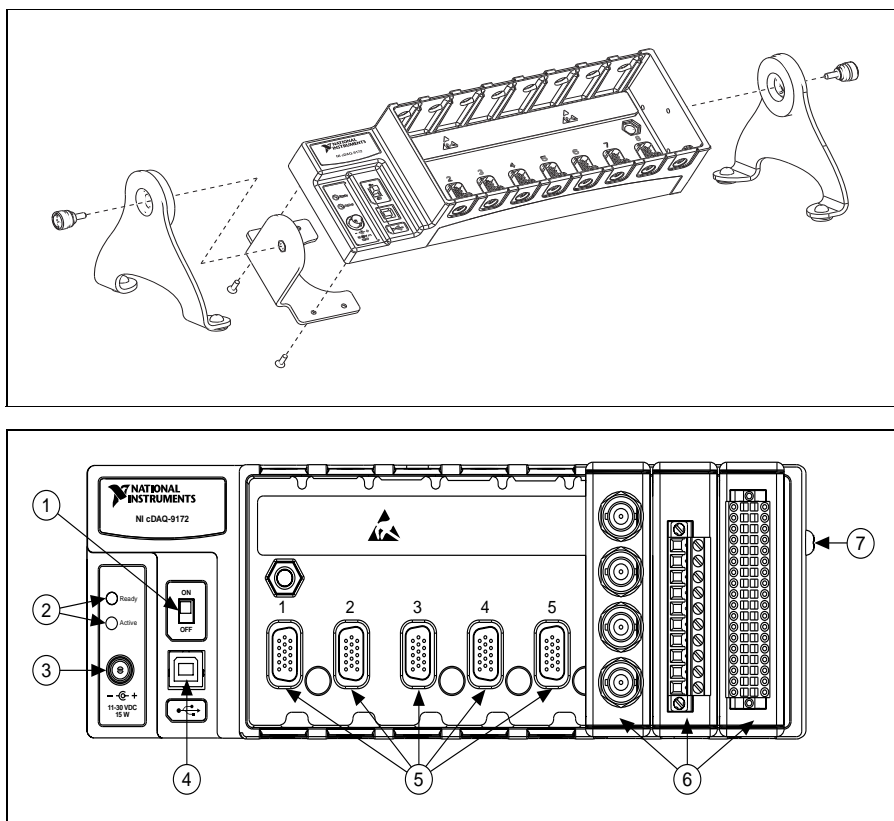


Figura 4.8: esquema frontal y posterior del bastidor NI-cDAQ-9172

1. Interruptor de encendido
2. LED Ready / Activo
3. Conector de alimentación
4. Conector USB
5. Ranuras para módulos vacíos
6. Módulos instalados de la Serie C (I/O)
7. Tornillo para conexión a tierra

4.3.4.2 Tarjeta de adquisición de datos NI-9233

La tarjeta del modelo NI-9233 de National Instruments es un módulo de cuatro canales de adquisición de señal dinámica apropiada para realizar medidas de frecuencia de audio de alta precisión desde sensores IEPE con los sistemas NI CompactDAQ o CompactRIO. Este módulo proporciona un rango dinámico de 102 dB e incorpora acondicionamiento de señales piezoeléctrico electrónico integrado (IEPE) para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada digitalizan señales simultáneamente en rangos de 2 a 50 kHz por canal con filtros integrados anti-aliasing que ajustan automáticamente su rango de muestreo.



Figura 4.9: Tarjeta de adquisición de datos modelo NI-9233

Sus principales características son:

- Acondicionamiento de señales IEPE de 2 mA para micrófonos y acelerómetros.
- Máxima velocidad de muestreo de 50 kS/s por canal; acoplado en AC (0.5 Hz).
- Resolución de 24 bits; rango dinámico de 102 dB; filtros anti-aliasing.
- 4 entradas analógicas muestreadas simultáneamente, rango de entrada ± 5 V.
- Compatibilidad con sensores inteligentes TEDS.

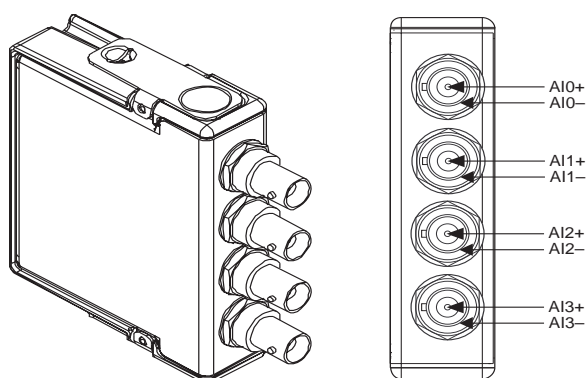


Figura 4.10: Esquema de la tarjeta de adquisición de datos modelo NI-9233

Cada canal tiene un conector BNC a la que se puede conectar un sensor de señal piezoeléctrico electrónico integrado (IEPE). El pasador central del conector, AI+, proporciona la excitación DC y la conexión de la señal AC. La carcasa del conector, AI-, proporciona la trayectoria de retorno de excitación y la referencia de tierra de la señal AC.

Los canales de entrada analógica de la tarjeta NI-9233 se conectan a la tierra del chasis a través de una resistencia de 50 Ω . Para reducir al mínimo el ruido de fondo, hay que asegurarse de que la tierra del chasis está conectada a la toma de tierra. Cada canal está protegido contra sobretensiones. La tarjeta NI-9233 proporciona una corriente de excitación IEPE para cada señal de entrada. La señal se acopla a AC, es amortiguada, y acondicionada. La señal es entonces muestreada por un Delta-Sigma ADC de 24bits.

El dispositivo NI-9233 utiliza una combinación de filtrado analógico y digital para proporcionar una representación precisa de las señales en banda al tiempo que rechaza las señales fuera de banda. Los filtros discriminan entre señales basadas en la gama de frecuencias, o ancho de banda, de la señal. Los tres anchos de banda importantes a considerar son la banda de paso, la banda de rechazo, y el ancho de banda llamado "libre".

4.3.4.3 Tarjeta de adquisición de datos NI-9205

La tarjeta modelo NI-9205 es un módulo de adquisición de señal de la serie C para usarse con chasis CompactDAQ y CompactRIO que cuenta con 32 entradas analógicas de una sola terminal y 16 diferenciales, con una resolución de 16 bits y una velocidad de muestreo máxima de 250 kS/s. Cada canal tiene rangos de entrada programables de ± 200 mV; ± 1 V; ± 5 V y ± 10 V. Para protegerse contra señales transitorias, la tarjeta NI-9205 incluye hasta 60V de protección contra sobrevoltajes entre canales de entrada y común (COM). Además esta tarjeta tiene doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad de ruido y alto rango de voltaje en modo común, su diseño está hecho para protección de sobrevoltaje transitorio de 1,000 Vrms. Las dos opciones de conector NI-9205son un conector de terminal de resorte de 36 posiciones para conectividad directa o un conector D-SUB de 37 posiciones.



Figura 4.11: Tarjeta de adquisición de datos modelo NI-9205

Sus principales características son:

- Posee 32 canales de una sola terminal o 16 canales diferenciales, velocidad muestreo de 250 kS/s.
- Rangos de medida programables de ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V y ± 10 V; resolución de 16 bits.
- Aislamiento de canal a tierra de 250 Vrms, CAT II (terminal de resorte) o canal a tierra de 60 VDC, CAT I (D-SUB).
- Conectores disponibles con terminal de resorte de 36 posiciones o D-SUB de 37 pines.
- Temperatura de operación de -40 °C a 70 °C, 5 g de vibración, 50 g de impacto.

A continuación en la figura 4.13 se presenta un esquema del dispositivo NI-9205:

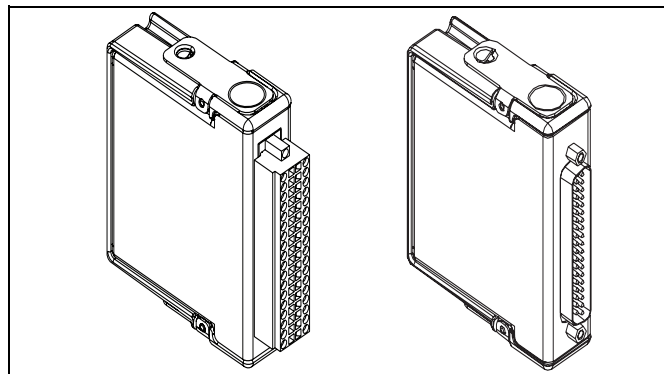


Figura 4.12: Esquema de la tarjeta de adquisición de datos modelo NI-9205

Puede utilizar una configuración de medida diferencial para lograr mediciones más precisas y menos ruido. Una configuración de medición diferencial requiere dos entradas para cada medición, lo que reduce el número de canales disponibles en la NI-9205 a 16.

4.3.5 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación utilizada es de la marca BLAUSONIC y su modelo es el FA-325 que proporciona una tensión de salida variable que oscila entre 0V y 30V, con una corriente de hasta 2,5 A. Todas las salidas están totalmente protegidas contra cortocircuitos en cualquier posición de los controles ya que la corriente máxima que puede suministrar está limitada. Además de la salida variable, la fuente FA-325

dispone de 2 salidas fijas (+5V y +12V), lo cual permite alimentar simultáneamente circuitos analógicos y digitales. Posee una robusta construcción, protecciones integradas y aplicaciones multifuncionales.



Figura 4.13: Fuente de alimentación BLAUSONIC FA-32534

A continuación se presenta una tabla con los datos técnicos de la fuente :

TENSIÓN DE SALIDA CORRIENTE DE SALIDA	0-30V 2.5A
RUIDO Y ZUMBIDO REGULACIÓN DE RED REGULACIÓN DE CARGA SALIDA FIJA 1 SALIDA FIJA 2 TENSIÓN DE RED PESO DIMENSIONES	5 mV rms 0.05% + 10 mV 0.05% + 10 mV 5V/1A 12V/1A 230V ±5% 50 Hz 4.5 kg 150 x 145 x 200 mm
INDICADOR DE VOLTAJE INDICADOR DE CORRIENTE	DIGITAL DIGITAL

Tabla 4.14:Tabla de especificaciones técnicas de la fuente de alimentación BLAUSONIC FA-32534

4.3.6 Bomba de engranajes Masterflex

Las bombas de engranajes demostraron ser la mejor tecnología de bombeo para la aplicación, ya que proporcionan un flujo uniforme, sin pulso, precisa y repetible. Se pueden usar durante largos periodos entre mantenimientos, haciéndolas adecuadas para el servicio continuo.

El accionamiento de la bomba digital Masterflex entrega cantidades precisas de fluidos a caudales ajustables. El uso de un microprocesador con un codificador de eje óptico permite al usuario obtener la cantidad de flujo deseado con excelente regulación de la velocidad. La unidad cuenta con un sistema que almacena



permanentemente los datos de calibración o los valores empíricos (que son los que el usuario elije).

La bomba es accionada por un motor de corriente continua de conmutación forzada. El motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica a través de la interacción de los dos campos magnéticos. Un campo es producido por un conjunto de imanes permanente unido a la carcasa del motor; el otro campo es producido por una corriente eléctrica que fluye a través de las bobinas de la armadura. Estos dos campos producen un par de torsión que hace que la armadura gire. Cuando la armadura gira, la corriente se conmuta (se desconecta) entre los devanados para producir una salida de par continuo. La fuerza contraelectromotriz es una tensión inducida producida por el movimiento relativo entre el campo de imán permanente y las bobinas de la armadura. Esto permite un control sencillo de la velocidad y del par ya que la velocidad es proporcional a la tensión aplicada, mientras que el par es proporcional a la corriente a través del motor. En las unidades de bomba peristáltica, la velocidad del motor se reduce a través de un sistema de engranajes para proporcionar la velocidad requerida por la bomba.

El variador de velocidad emplea un puente rectificador controlado de fase para variar la potencia aplicada al motor de corriente continua. El puente sólo conducirá corriente cuando el voltaje de línea de energía excede la tensión en los terminales del motor. Por consiguiente, la potencia al motor puede ser controlada variando el punto en el que el puente comienza a conducir, respecto a la fase del voltaje de línea. El ángulo de fase en la que comienza el puente conductor es controlado por un bucle regulador de velocidad.



Figura 4.15: Bomba de engranajes Masterflex

A continuación se presenta un esquema especificando las partes de la bomba.

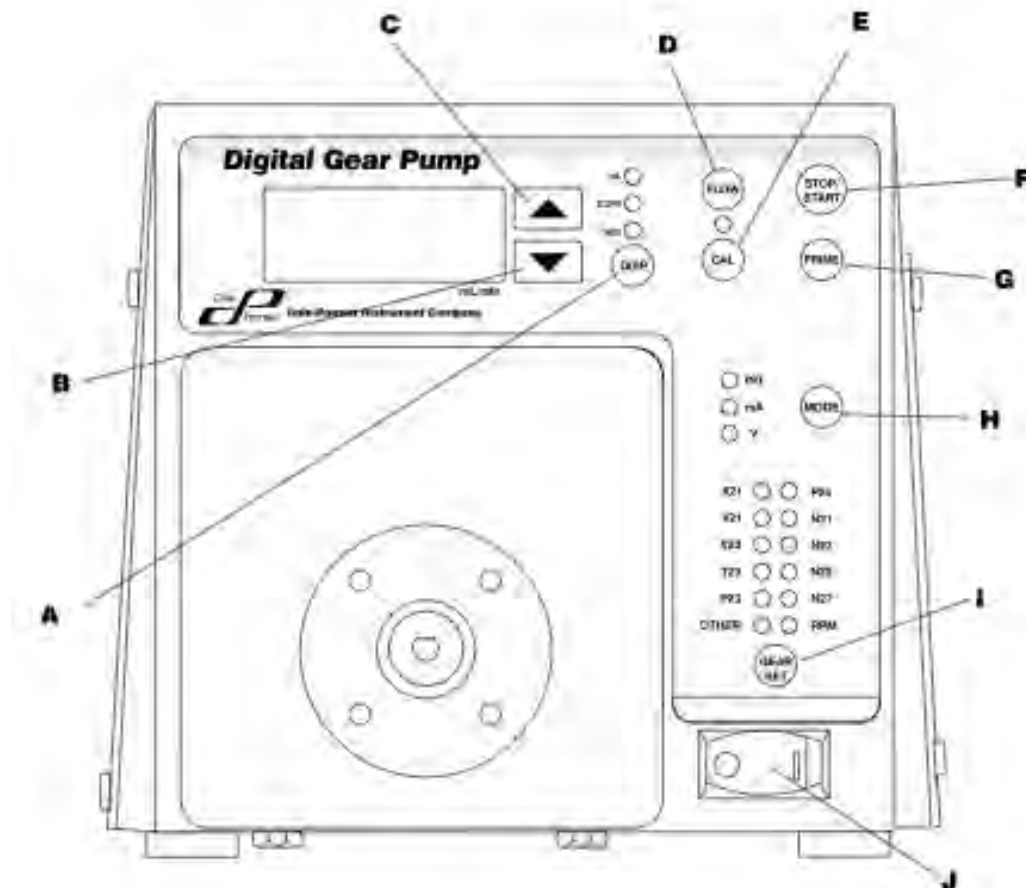


Figura 4.16: Esquema de la bomba de engranajes Masterflex

- A. Descargar/copiar.-** Selecciona el volumen descargado, el número de copias de un volumen descargado o el intervalo de descargas.
- B. Flecha abajo.-** disminuye el valor de una pantalla intermitente.
- C. Flecha arriba.-** aumenta el valor de una pantalla intermitente.
- D. Control de caudal.-** Fija el caudal de la bomba para el juego de engranajes seleccionado, para cambiar el caudal se pulsa la flecha arriba/abajo.
- E. Control de calibración.-** Refina la calibración integrada, usando un volumen medido.
- F. Stop/Star.-** para o arranca el motor.
- G. Cebar.-** hace funcionar la bomba a plena velocidad para llenar o vaciar las tuberías.
- H. Selección de modalidad.-** INT para control interno, mA para control remoto de corriente, V para control remoto de voltaje.
- I. Juego de engranajes.-** Selecciona el juego de engranajes, que en este caso es el V21.
- J. Interruptor de alimentación.-** todos los ajustes se guardan en la memoria.

El juego de engranajes que se usa es el V 21 y funciona bajo el principio de transmisión magnética que consiste en dos imanes, un imán de conducción que se conecta al eje del motor y un imán accionado que está completamente sellado dentro de la bomba de cabeza y está conectado al engranaje de accionamiento. El imán conducido es un componente que se moja y por lo tanto está totalmente encapsulado. Los imanes crean un par que hace que los engranajes giren sin contacto físico.

El desacoplamiento se produce cuando la carga de la bomba excede el par de acoplamiento entre los dos imanes. Esta función puede actuar como un dispositivo de seguridad para evitar daños a la bomba y al motor, así como las tuberías asociadas. Por esta razón dependiendo del rango de pares o mas bien dicho de caudales con el que se quiere trabajar se debe elegir el cabezal con el juego de engranajes.

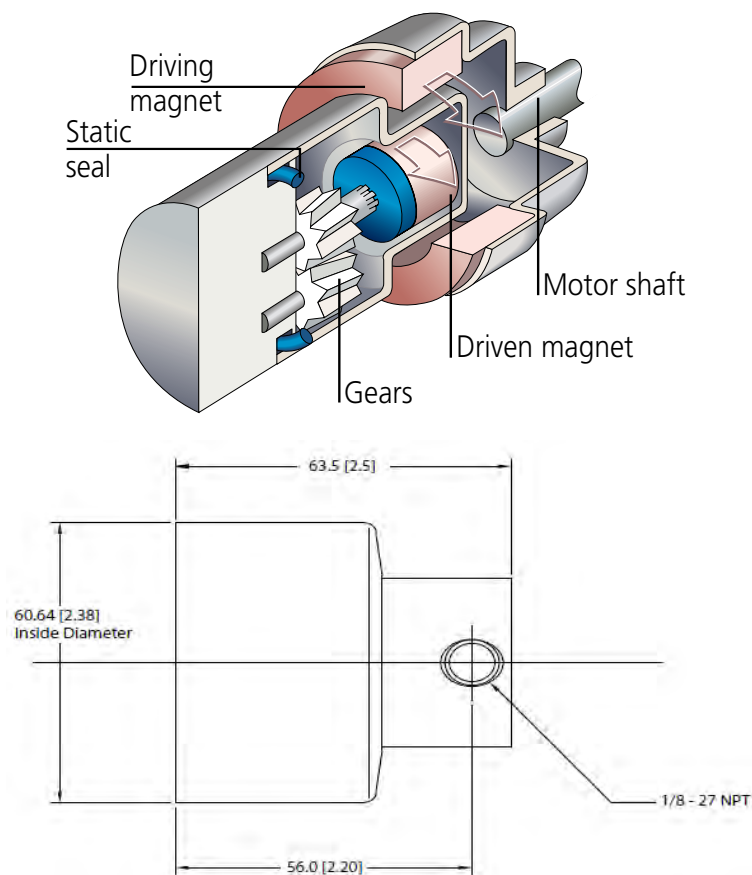


Figura 4.17: Esquema del cabezal de engranajes V 21

A continuación se presenta un cuadro con algunos juegos de engranajes y sus características:

SERIES GA				
	X21 GEARS	V21 GEARS	V23 GEARS	T23 GEARS
Flow Rate @3450 rpm	0.06 l/min (0.016gpm)	0.145 l/min (0.038 gpm)	0.290 l/min (0.077 gpm)	0.322 l/min (0.085 gpm)
Flow Rate @2850 rpm	0.05 l/min (0.013gpm)	0.120 l/min (0.032 gpm)	0.245 l/min (0.065 gpm)	0.270 l/min (0.071 gpm)
Max. Speed	8000 rpm			
Max. System Pressure	21 bar (305 psi) standard			
Max. Differential Pressure (Continuous Duty)	2.8 bar (40.6 psi)			5.2 bar (75.4 psi) Hex 2.8 bar (40.6 psi) Pin
Max. Differential Pressure (Intermittent Duty)	2.8 bar (40.6 psi)			5.2 bar (75.4 psi) Hex 2.8 bar (40.6 psi) Pin
Max. Differential Pressure (Blocked Outlet)	27.6 bar (400.3 psi)		20.7 bar (300.2 psi)	
Max. De-Coupling Torque	21 mN*m (0.186 in*lbs) C-mount / 78 mN*m (0.69 in*lbs) A or B-mount Ferrite Magnets / 554 mN*m (4.9 in*lbs) Rare Earth Magnets			
Viscosity Range	0.2 to 1500 centipoise			
Fluid Temperature Range	-46 to +177°C (-51 to +351°F)			
Bypass Valve	Not Available			
Noise Level	Less than 70 dbA			
Weight	0.24 kg (0.53 lbs) A-mount / 0.27 kg (0.59 lbs) B-mount / 0.31 kg (0.68 lbs) C-mount			

Tabla 4.18: Tabla de especificaciones de los juegos de engranajes de la serie GA.



CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para poder realizar una explicación más sencilla y ordenada de cómo se lleva a cabo el procedimiento experimental se procede a continuación a detallar los siguientes pasos:

Paso 1.- Antes de nada se debe caracterizar el comportamiento del lecho en condiciones normales ya que es el punto de partida para este trabajo. Se hace referencia a la figura 4.1 para explicar el procedimiento experimental.

En primer lugar se pone en marcha la instalación sin que el motor eléctrico funcione, es decir sin que el distribuidor de aire gire, una vez hecho esto, cuando se ha verificado que todos los sistemas de medida están funcionando y están calibrados se inicia las mediciones de presión, humedad relativa y temperatura tanto en el plenum como en el interior del lecho. En el interior del lecho se realizan las mediciones a una altura de 7,25 cm y a 14,5 cm de la base.

Paso 2.- Para determinar experimentalmente la velocidad de mínima fluidización, las mediciones se inician con un caudal de aire de 100 l/min y con una duración de 4 minutos, a continuación se sube el caudal a 200 l/min y con la misma duración de 4 minutos. Este procedimiento se repite incrementando el caudal de 100 en 100 hasta llegar a un caudal de 1300 l/min y haciendo que cada medición dure 4 minutos, ya que experimentalmente se ha visto que es el tiempo suficiente para obtener más de 10000 datos y de esta forma garantizar la fiabilidad de las mediciones y de sus posteriores análisis.

Una vez que se ha realizado la toma de estos datos, en MATLAB se analizan las mediciones mediante la desviación típica con el objetivo de saber a partir de que caudal dicha desviación empieza a incrementarse notoriamente y así saber que justo en el caudal en el que sucede eso se producirá la velocidad de mínima fluidización.

Este mismo análisis se hará para el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min y para el caso en el que gire a 100 rev/min. Posteriormente se analizan estos resultados para ver como varía la velocidad de mínima fluidización en cada caso.

Paso 3.- Como siguiente paso se procede a realizar las mediciones haciendo que el distribuidor de aire gire a 50 rev/min, para ello primero se comprueba que a partir de un caudal de aire de unos 700 l/min el lecho está fluidizando, (esto se puede apreciar a simple vista por la gran cantidad de burbujas que hay en el lecho).

Por seguridad de no dañar el equipo, sobre todo el distribuidor y el motor eléctrico se inician las mediciones con un caudal de 800 l/min e incrementándolo de 50 en 50 hasta 1300 l/min y de igual forma que en el paso anterior se establece que los tiempos de medida para cada caudal duren 4 minutos. Una vez obtenidas las medidas bajo estas condiciones también se procede a determinar la velocidad de mínima fluidización como se explicó anteriormente.



Una vez finalizada esta operación, se vuelve a repetir el mismo procedimiento explicado en el paso 3 con la única salvedad de que el distribuidor ahora gira a 100 rev/min. Por tanto se puede decir que el estado de referencia o punto de partida es caracterizar el comportamiento del lecho en tres estados diferentes que son: sin giro del distribuidor, con giro del distribuidor a 50 rev/min y con giro del distribuidor a 100 rev/min.

Paso 4.- Una vez que se ha llegado a este punto, lo siguiente es definir los estados en los que se va a ensayar los aglomerados, para lo cuál se va a trabajar siempre con un caudal de 1100 l/min, con el objetivo de garantizar una fluidización turbulenta ya que así cuando se forme algún aglomerado en el interior del lecho se observará claramente el efecto que causa este en la calidad de la fluidización.

Nuevamente se inician las mediciones, previa verificación del correcto funcionamiento y calibración de los equipos, con un caudal constante de 1100 l/min y sin hacer girar el distribuidor, una vez que hayan transcurrido 4 minutos se introduce la sonda que se observa en la figura 5.1 con el objetivo de inyectar el agua.

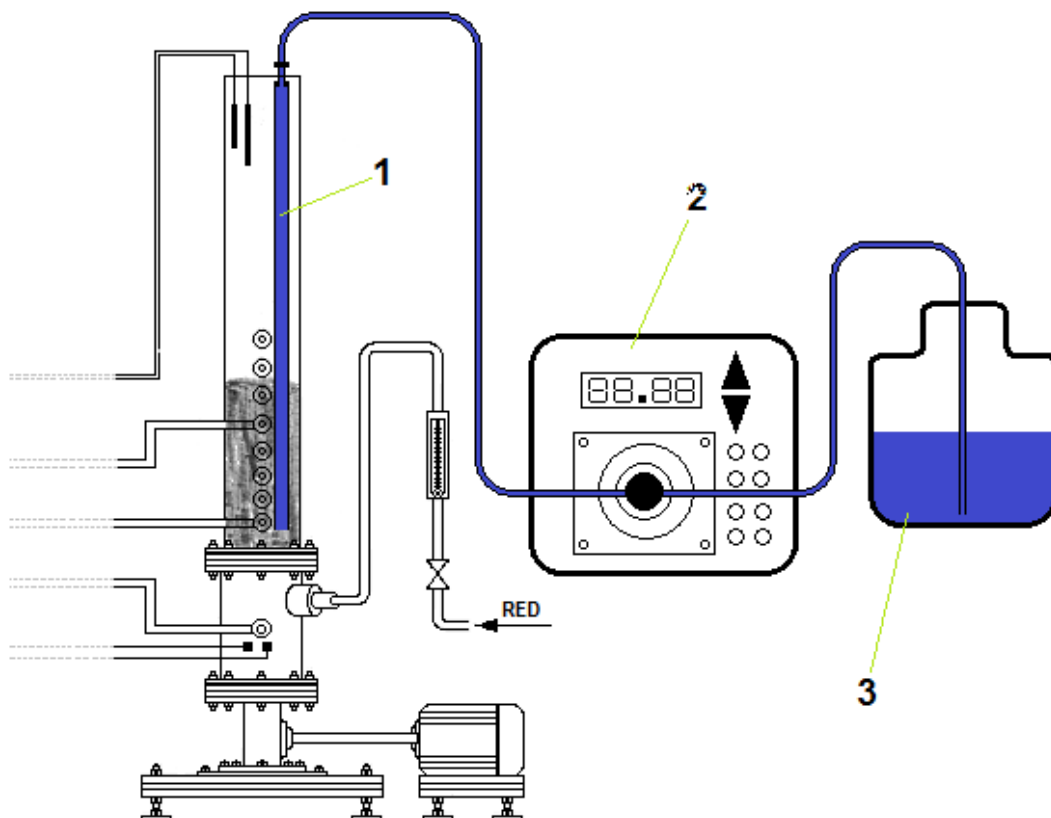


Figura 5.1: Esquema de la instalación para simular la formación de aglomerados. 1.- sonda para inyectar agua. 2.- Bomba de engranajes Masterflex. 3.- Depósito de agua.

En un primer caso se inyecta 40 ml en un minuto, con lo cuál se puede apreciar en los sensores de humedad que la humedad relativa en el plenum permanece prácticamente constante pero en el lecho aumenta vertiginosamente. La medición termina cuando las humedades relativas del plenum y del lecho vuelven a tener valores similares.

El siguiente caso será inyectar 40 ml en un lapso de tiempo que dura 3 minutos y de igual forma habrá que esperar que las humedades relativas del plenum y del lecho vuelvan a tener valores semejantes para finalizar la medición.

Un tercer caso será inyectar 40 ml durante 5 minutos y repetir nuevamente el proceso. Cabe recalcar que en los tres casos anteriores el agua se tiene que inyectar a los 4 minutos de iniciada la medición.

Paso 5.- Posteriormente se vuelve a repetir las operaciones anteriores del paso 4 con la salvedad de que en este caso se inyecta 60 ml en 1 minuto, 60ml en 3 minutos y 60 ml en 5 minutos aplicando las mismas condiciones que se explicaron anteriormente.

Paso 6.- Finalmente se vuelve a repetir el mismo proceso pero ahora se inyecta un volumen de 80 ml en 1 minuto, 80 ml en 3 minutos y 80 ml en 5 minutos sin variar las condiciones que se aplicaron en el caso de 40 ml y de 60 ml.

Paso 7.- Un nuevo experimento será hacer lo mismo que se explicó en los pasos anteriores, solo que ahora se hace girar el distribuidor de aire a 50 rev/min y nuevamente se hacen las mediciones para 40 ml, 60 ml y 80 ml inyectados en 1 minuto, en 3 minutos y en 5 minutos, para cada volumen.

Paso 8.- Como último experimento se realiza exactamente lo mismo que se ha expuesto en el párrafo anterior solo que ahora el distribuidor se hace girar a 100 rev/min.

Paso 9.- Una vez que se han recopilado los datos de las mediciones explicadas desde el paso 4 hasta el 8, se procede a estudiarlos en MATLAB con el objetivo de realizar dos tipos de análisis. Por un lado analizar la señal mediante el método de las fluctuaciones de presión, en el dominio del tiempo para obtener los tiempos de defluidización y los tiempos de regeneración. Además se hace aplica el método de las fluctuaciones de presión en el dominio de la frecuencia para determinar la frecuencia característica del lecho.

Por otro lado se aplica el método que analiza las señales de presión y de humedad relativa con el objetivo de determinar los tiempos de secado del agua que se inyectó al inicio de cada ensayo.

En el capítulo 7 se explican los resultados y las comparaciones que pueden existir entre el método que se usa para caracterizar el lecho mediante las fluctuaciones de presión y el que se utiliza para ensayar los aglomerados mediante el estudio de las temperaturas y las humedades relativas tanto del lecho como del plenum.



CAPÍTULO 6: MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

Antes de nada, en la figura 6.1 se presenta un esquema tipo resumen de los métodos de análisis de las señales que se usan en este trabajo, con el objetivo de poder interpretar con mayor facilidad el orden de los resultados que se exponen en el capítulo 7.

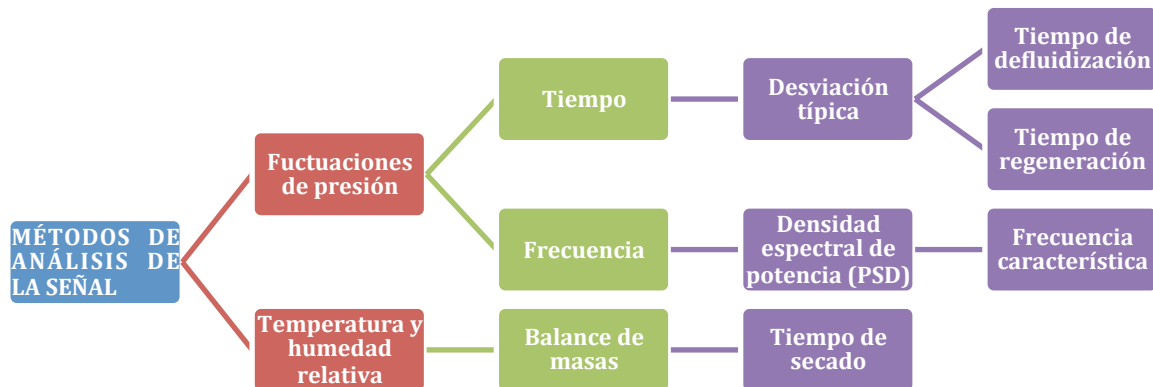


Figura 6.1: Esquema de los métodos de análisis de las señales.

Para este trabajo, se ha decidido realizar dos tipos de análisis, por un lado se estudia las fluctuaciones de presión y por otro se estudia conjuntamente las señales de temperatura y humedad relativa.

En primer lugar se lleva a cabo un análisis de las fluctuaciones de presión mediante un estudio que se hace en MATLAB, que está basado en herramientas lineales en el dominio del tiempo y otro basado en el dominio de la frecuencia. El que se basa en el dominio del tiempo requiere estudiar la desviación típica y gracias a esto, es factible determinar el tiempo de defluidización, que como su nombre lo indica es el tiempo que tarda el lecho en perder su capacidad de fluidizar, así como también es factible determinar el tiempo de regeneración que no es otra cosa que el tiempo que tarda el lecho en volver a recuperar su capacidad de fluidizarse. El caso del dominio de la frecuencia, permite realizar un análisis de la densidad espectral de potencia (PSD Power Spectral Density), la cuál permite acceder a una información pormenorizada sobre todo lo que tiene que ver con los fenómenos que se producen en el interior del lecho, hasta el punto de poder realizar una caracterización óptima de su comportamiento.

En segundo lugar se efectúa un estudio a la par de las señales de humedad relativa y temperatura, con lo cual se puede determinar el porcentaje de humedad en el interior del lecho o lo que es lo mismo el porcentaje o cantidad de agua que se ha secado, así como el tiempo que tarda dicha eliminación de humedad.

A continuación en la figura 6.2 se hace un esquema explicativo de la representación gráfica de la desviación típica versus el tiempo de la señal de presión.

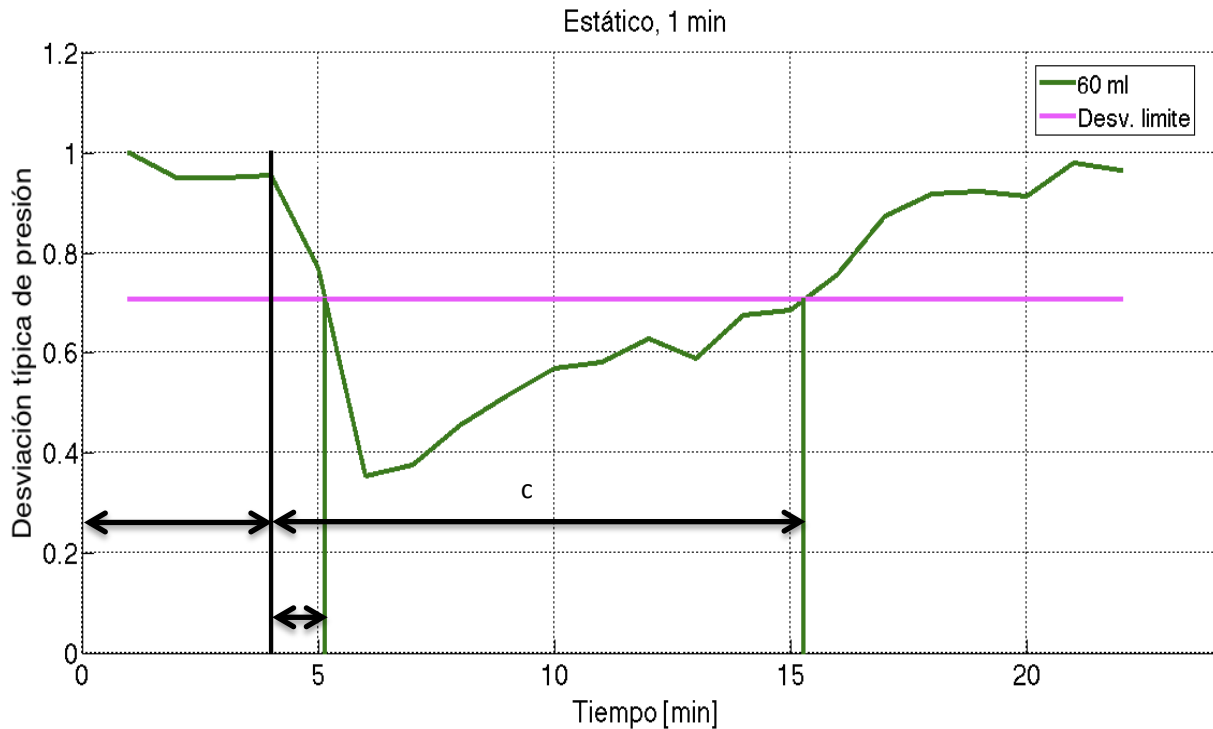


Figura 6.2: Desviación típica versus tiempo. Donde (a) son los 4 minutos a los que se empieza a inyectar el volumen de agua, (b) es el tiempo de defluidización y (c) es el tiempo de regeneración.

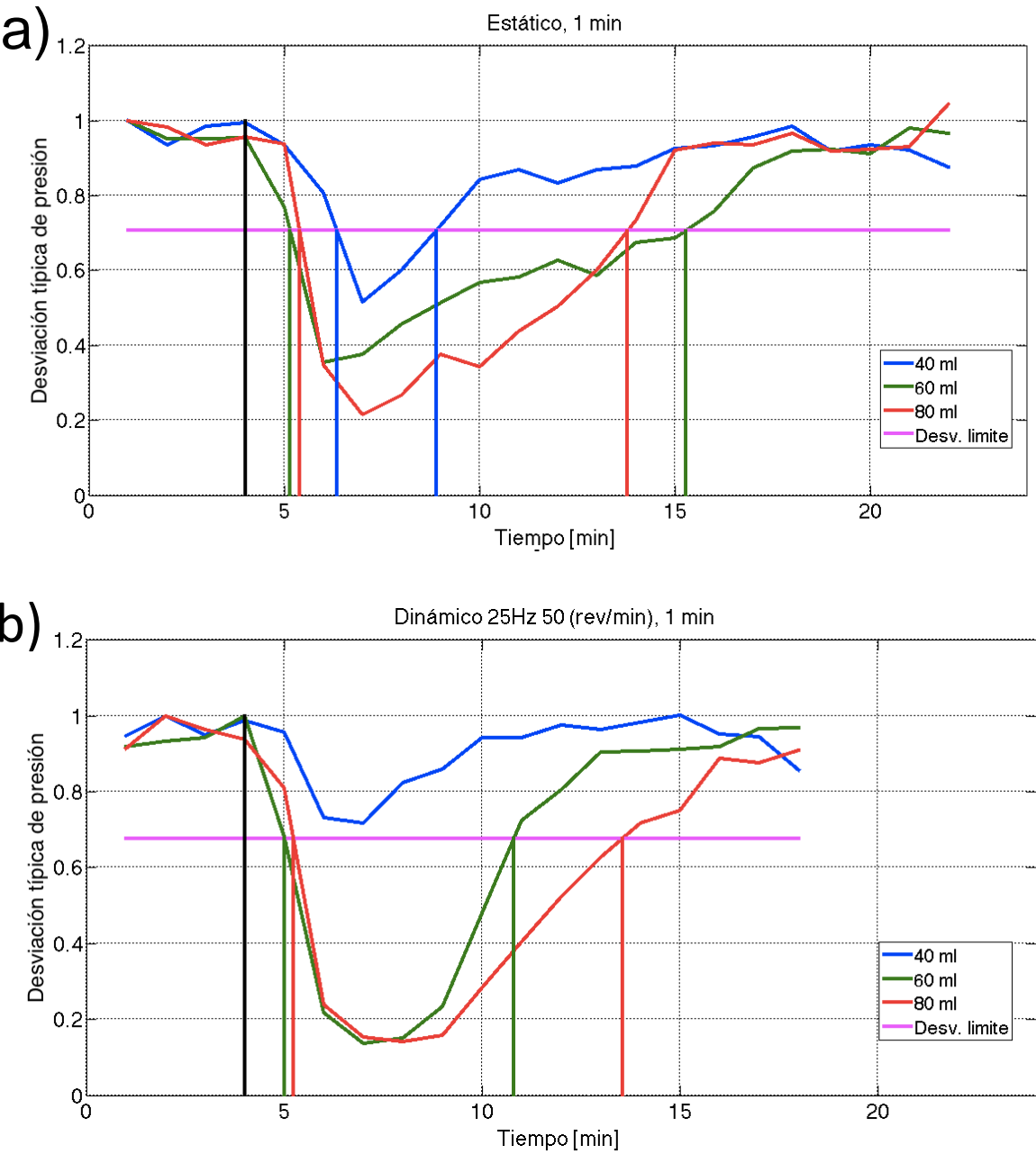
En la figura 6.2, se aprecia que hay una línea horizontal de color violeta que representa lo que en este estudio se determina la **desviación típica límite**.

Esta **desviación típica límite** se calcula con el objetivo de establecer un parámetro de control que permita a su vez establecer los tiempos de defluidización y de regeneración del lecho.

Además se puede apreciar que el tramo (a) representa el tiempo de 4 minutos que es cuando se inicia la inyección de agua, el tramo (b) representa el tiempo de defluidización y el tramo (c) señala el tiempo de regeneración o lo que es lo mismo el tiempo que tarda el lecho en volver a ser capaz de fluidizarse.

Se hace el análisis dividiendo los ensayos en tres grandes grupos, el de 1 minuto, el de 3 minutos y el de 5 minutos. En cada grupo se hacen tres gráficas que corresponden al estado estático, al dinámico de 25 Hz (50 rev/min) y al dinámico de 50 Hz (100 rev/min) y cada gráfica tiene 3 curvas distintas correspondientes a los volúmenes de 40, 60 y 80 ml.

A continuación en la figura 6.3 se presenta como ejemplo el caso de un minuto.



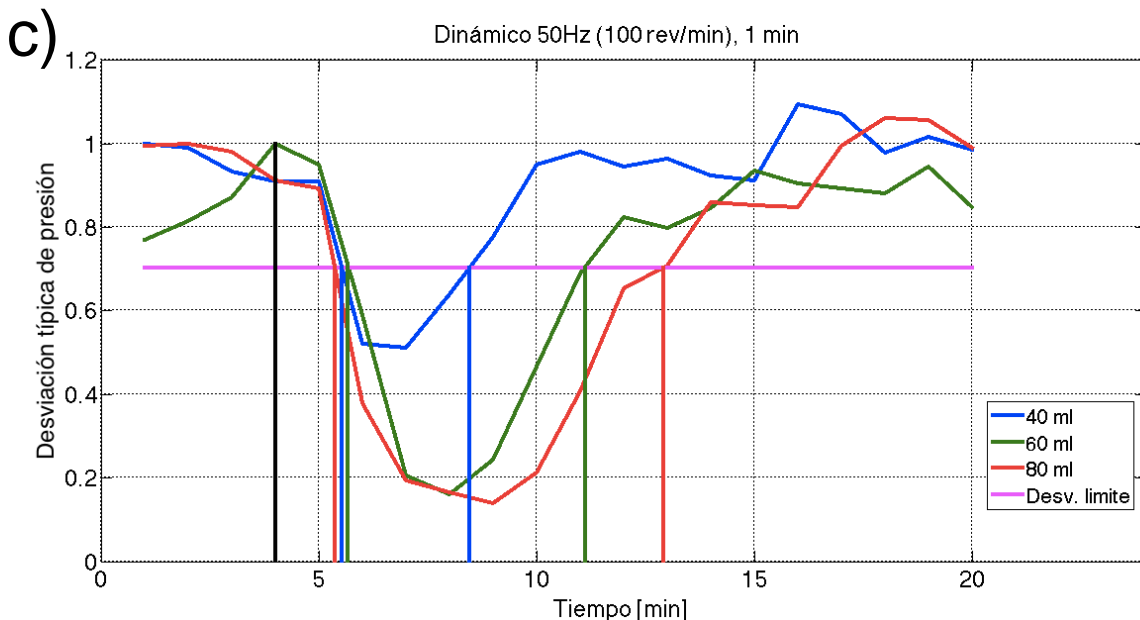


Figura 6.3: Gráficas de la desviación típica versus el tiempo, cuando la inyección del agua es durante un minuto para los volúmenes de 40, 60 y 80 ml, en los casos en los que el distribuidor está (a) estático, (b) cuando gira con una velocidad de 50 rev/min y (c) cuando gira a 100 rev/min.

En la figura 6.3, las señales de 40 ml, 60 ml y 80 ml representadas con los colores azul, verde y rojo respectivamente, se ha determinado que pueden o no intersectarse solo en dos puntos con la mencionada **desviación típica límite**. En caso de que alguna de las señales no se cruce con la línea horizontal de color violeta, quiere decir que se forman pequeños aglomerados que bajan la calidad de fluidización, pero que no llegan a defluidizar el lecho, así que en la tabla 7.3.1 se marcan con ceros los casos en los que se dé esta situación.

Entonces por ejemplo en el caso de la primera gráfica (Estático, 1 minuto) se puede ver que la señal correspondiente a los 40 ml de color azul, se cruza con la línea horizontal que representa la **desviación típica límite** en dos puntos que en concreto son en el tiempo 6,88 segundos y en el tiempo 8,89 segundos. Por una parte, es sencillo concluir que el tiempo de defluidización es 6,88 menos 4, es decir 2,88 segundos ya que no se toman en cuenta los primeros 4 minutos en donde aún no se ha inyectado el agua y que por lo tanto no entran en el tiempo de defluidización. Por otra parte también se sabe que el tiempo de regeneración, es decir el tiempo que el lecho tarda en volver a fluidizarse es de 4,89 segundos ya que tampoco se toman en cuenta los primeros 4 minutos del ensayo. Para los demás casos se realiza el mismo análisis explicado anteriormente y sus resultados se presentan en la tabla 7.3.1 del capítulo 7.

Seguidamente se presenta en la figura 6.3 una representación esquemática de un espectrograma.

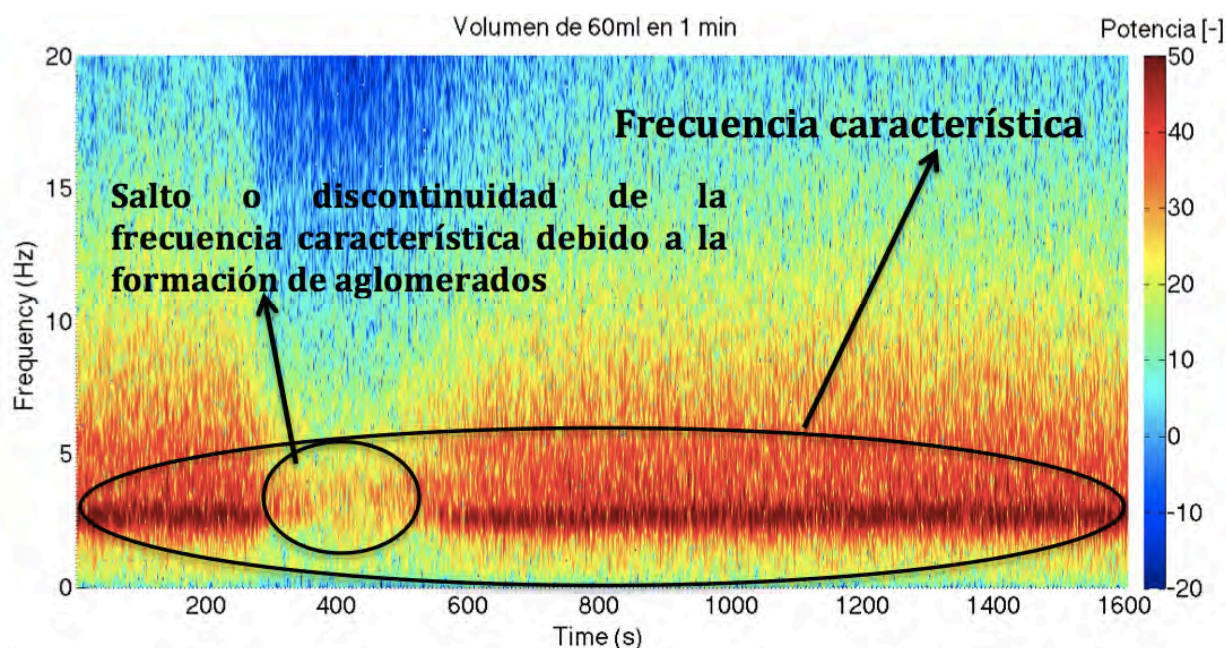


Figura 6.3: Espectrograma de la señal medida en el plenum del lecho fluidizando con un caudal de 1100 l/min con el distribuidor girando a 50 rev/min luego de haber inyectado 60 ml de agua durante 1 minuto.

En la figura 6.3 se aprecia claramente que la franja de color rojo representa la frecuencia característica que en este caso es de unos 2 Hz más o menos. La franja es bastante marcada y continuada, es decir que no tienes interrupciones o saltos que puedan representar estados defluidizados, como se verá en los resultados que se obtienen en el capítulo 7.

Finamente, en la figura 6.4 se presenta un ejemplo de la cantidad de agua secada, luego de haber analizado las señales de temperatura y de humedad relativa.

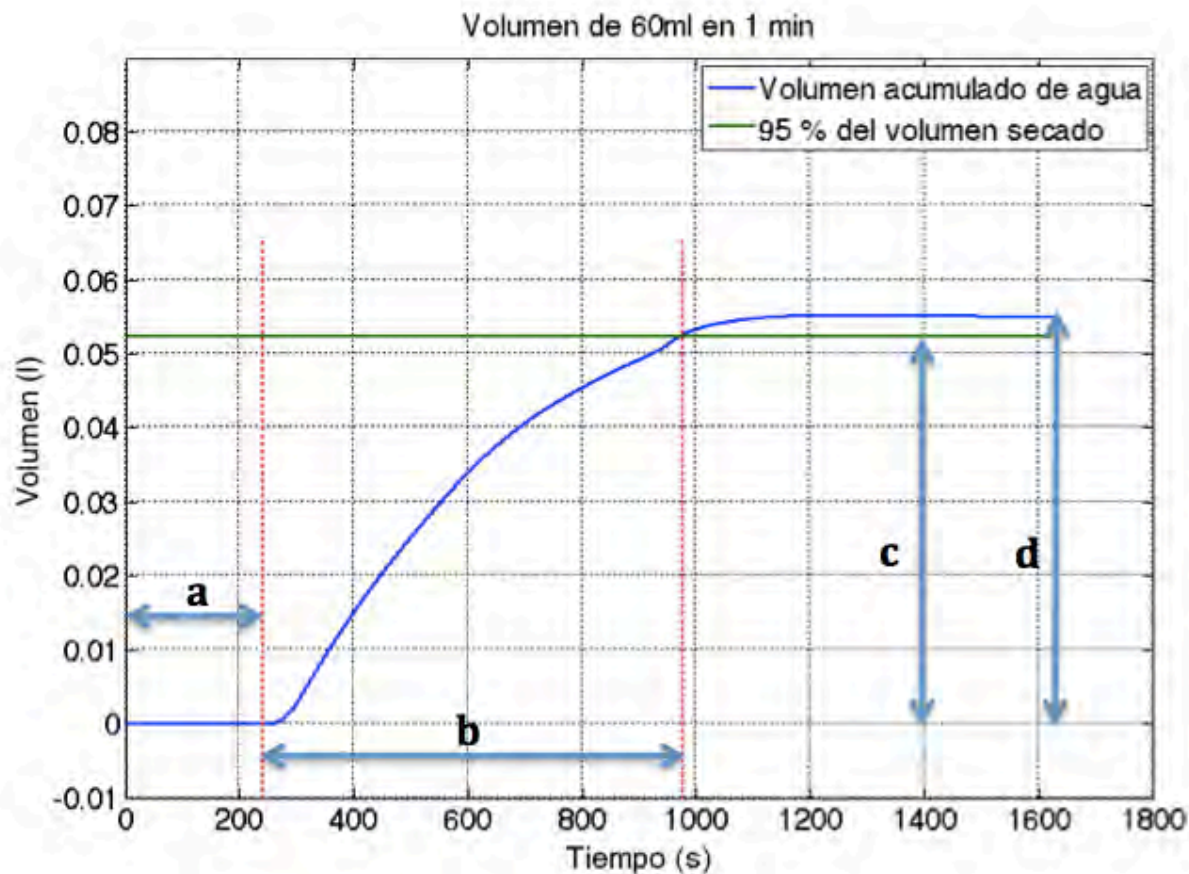


Figura 6.4: Volumen secado versus el tiempo, sin que gire el distribuidor de aire.

En la figura 6.4 se aprecia que el tramo (a) representa nuevamente el tiempo de 4 min que es cuando se inyecta el agua y por tanto es cuando se empieza a secar el líquido, por lo que el tramo (b) representa el tiempo de secado. Para facilitar los cálculos se ha determinado que el resultado con el que se va a trabajar será cuando se seque el 95 % del agua que se ha inyectado(tramo (c)). Y finalmente el tramo (d) representa el final del ensayo, es decir cuando se ha secado el 100 % del agua que se ha inyectado al inicio del experimento.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS

Las medidas de presión variando el caudal de aire se han analizado mediante el método de las fluctuaciones de presión tomadas en el plenum del lecho, con el objetivo de determinar la velocidad de mínima fluidización.

7.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

A continuación se presentan los resultados que se han obtenido a la hora de determinar el caudal correspondiente a la velocidad de mínima fluidización, para ello este estudio se centra en la medición que se realiza en el plenum ya que por varios motivos que se explicó en capítulos anteriores es más sencillo y fiable trabajar con los datos obtenidos en esta zona. El análisis se realiza para los tres casos que se ha explicado anteriormente que son: con el distribuidor de aire sin giro, con un giro de 50 rev/min y con un giro de 100 rev/min.

A continuación, en la figura 7.1.1 se representa la desviación típica de los datos muestreados versus los caudales con los que se ha trabajado. Se puede observar claramente que hay dos zonas muy bien diferenciadas que son: la primera que va de 0 a 700 l/min donde la desviación típica prácticamente no varía y la segunda zona donde a partir de los 700 l/min se aprecia que la desviación empieza a variar notoriamente, con lo cual se concluye que la velocidad de mínima fluidización se produce a los 700 l/min.

Es importante denotar que la señal tomada a 14,5 cm es decir prácticamente cerca de la parte superior de la arena, apenas detecta fluctuaciones, mientras que la señal medida a 7,25 cm es bastante parecida a la señal que se recoge en el plenum, por tanto se resolvió trabajar con los datos recopilados en el plenum ya que se garantiza una correcta toma de datos, dado que se elimina la posibilidad de que partículas de arena se introduzcan en las sondas de presión, que a su vez pueden producir taponamientos o erosión de dichas sondas.



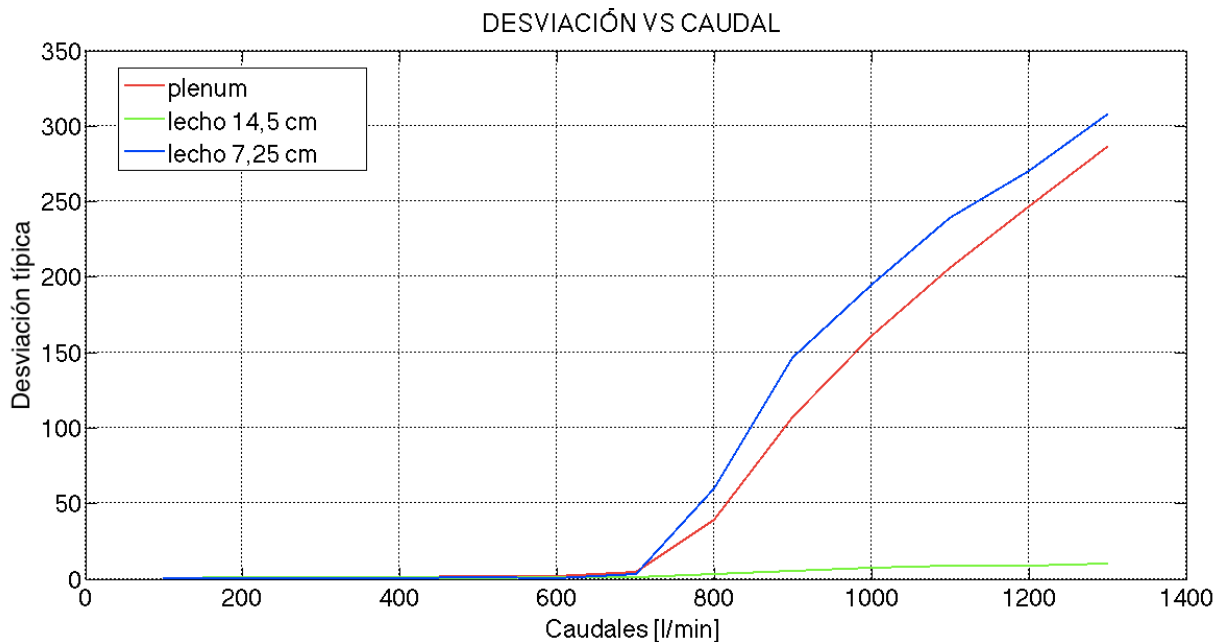


Figura 7.1.1: Determinación del caudal correspondiente a la mínima velocidad de fluidización para el caso en el que el distribuidor de aire no gira.

Además, para hacer una comparación entre los casos en los que el distribuidor está estático, rota a 50 rev/min o a 100 rev/min se presenta en la figura 7.1.2 las curvas de desviación típica frente a los caudales medidos en el plenum.

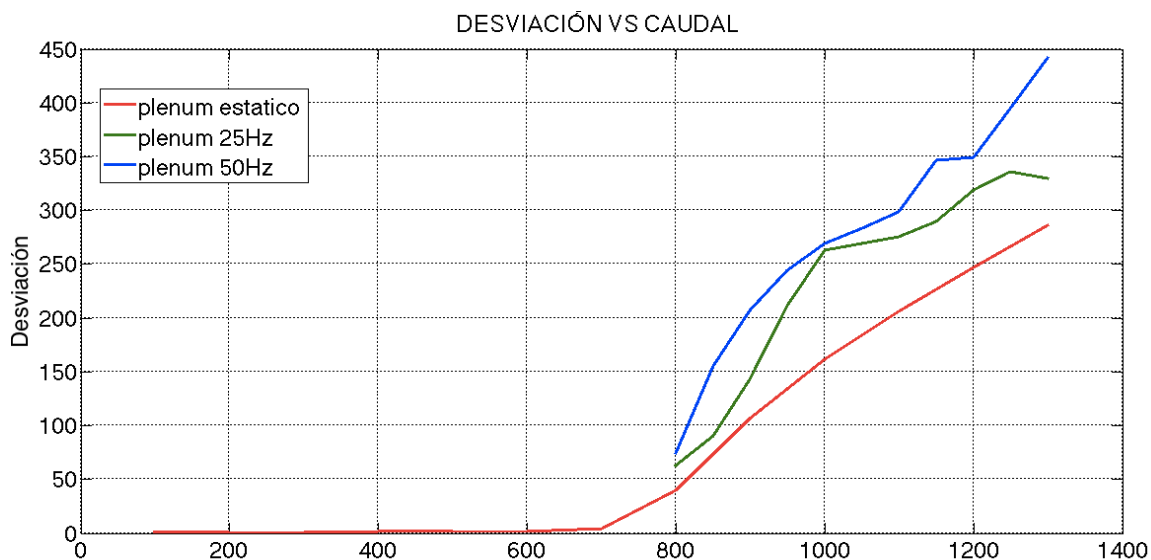


Figura 7.1.2: Determinación de los caudales correspondientes a la mínima velocidad de fluidización para los tres casos. Sin giro de distribuidor, giro de 50 rev/min (25 Hz) y giro de 100 rev/min (50 Hz).

Para visualizarlo de mejor manera, se utiliza la función **cftool** de MATLAB, que permite linealizar una función y de esta forma saber con mayor exactitud cuál es el caudal donde se genera la velocidad de mínima fluidización, tal y como se ha explicado en el apartado 3.2. A continuación se representan en la figura 7.1.3 los datos experimentales correspondientes al plenum, mostrados en la figura 7.1.2, junto con sus respectivas linealizaciones.

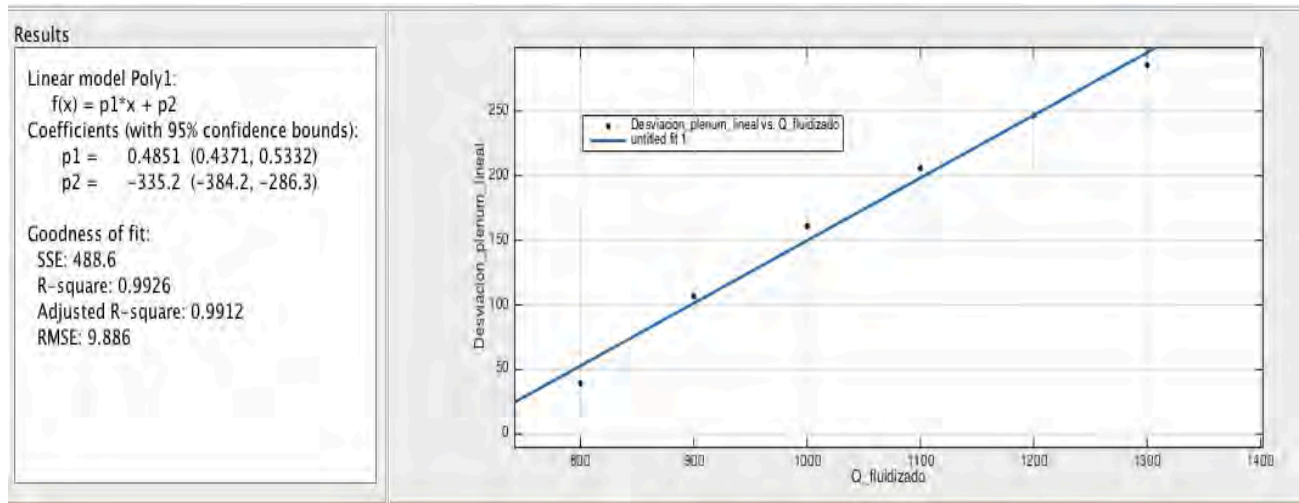


Figura 7.1.3: Linealización de la función correspondiente al caudal que origina la mínima velocidad de fluidización para el caso en el que el distribuidor no gira.

En el lado izquierdo de la gráfica 7.1.3 se aprecia que la linealización que se hace es de tipo polinomial de grado uno, con lo cual tiene la siguiente expresión general:

$$f(x) = p_1 * x + p_2$$

El programa entrega los valores de p_1 y p_2 y de esta manera, si se da un valor de cero a $f(x)$ es factible calcular los valores de x que en este estudio equivale al caudal correspondiente a la velocidad de mínima fluidización.

Mediante MATLAB se realiza el mismo proceso que se ha explicado el caso estático para poder obtener los caudales correspondientes a las velocidades de mínima fluidización tanto en el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min como en el caso en el que gira a 100 rev/min.

A continuación se presentan en las gráficas 7.1.4 y 7.1.5 la linealización de los datos de desviación típica versus los caudales correspondientes a los casos en los que el distribuidor de aire gira a 50 rev/min y a 100 rev/min respectivamente. Cabe recalcar que en estos dos casos las mediciones se realizaron con un caudal inicial de 800 l/min, de esta forma se garantiza que en el momento en el que se pone en marcha el

giro del distribuidor el lecho ya está fluidizado, con lo cual se evita cualquier daño que se pueda producir en la instalación, ya que de lo contrario las partículas de arena al estar casi sin movimiento impedirían que el distribuidor empiece a girar con normalidad. En estos dos casos para realizar las mediciones los caudales se van incrementando de 50 en 50 desde 800 l/min hasta llegar a 1300 l/min.

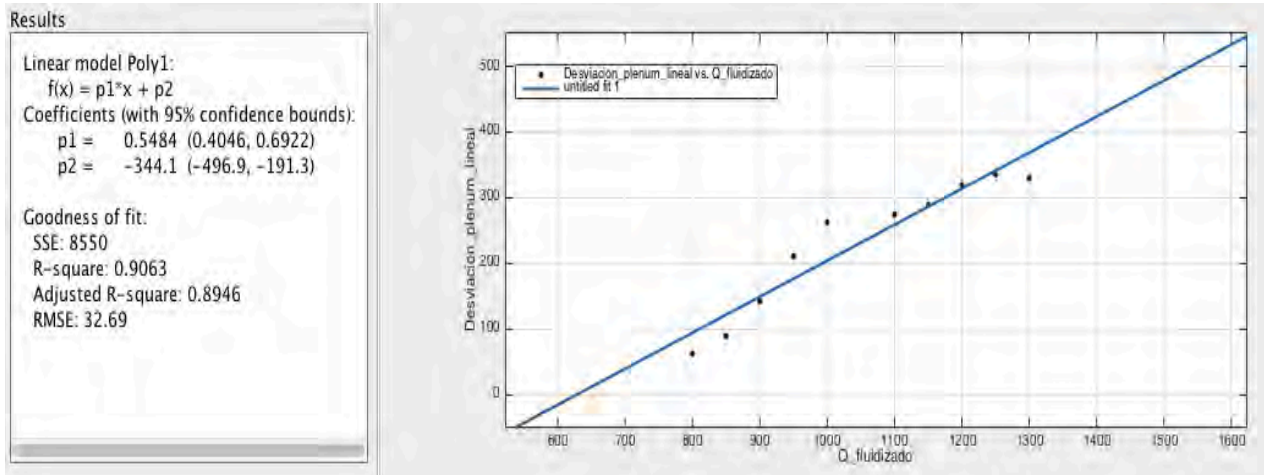


Figura 7.1.4: Linealización de la función correspondiente al caudal que origina la mínima velocidad de fluidización para el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min.

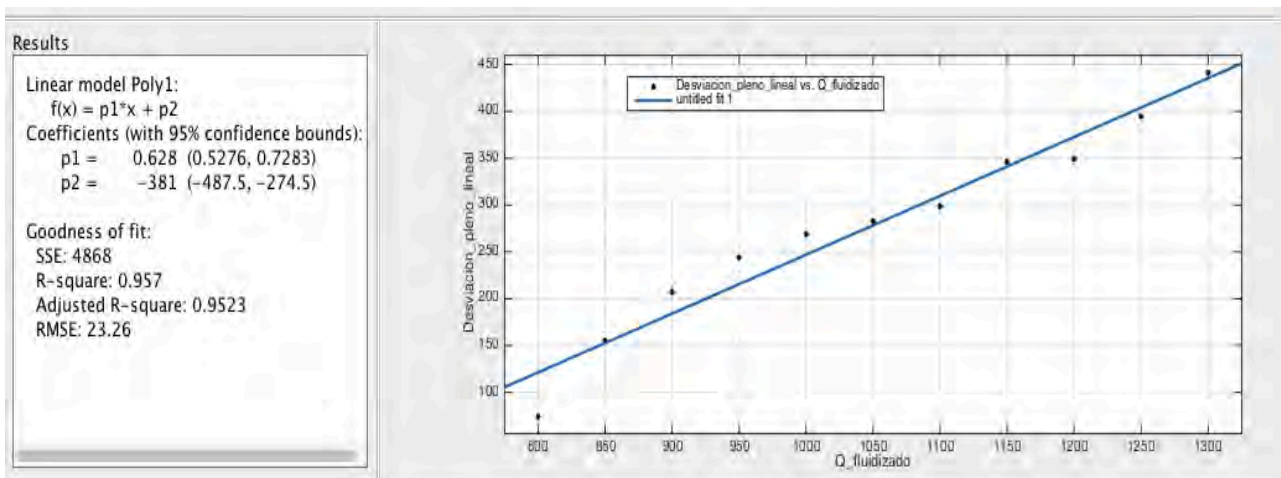


Figura 7.1.5: Linealización de la función correspondiente al caudal que origina la mínima velocidad de fluidización para el caso en el que el distribuidor gira a 100 rev/min.

A continuación en la tabla 7.1.1 se presentan los resultados obtenidos en los tres casos en los que se realiza la linealización de los datos de las desviación típica versus el caudal con el objetivo de apreciar de mejor manera cuál es la velocidad de mínima fluidización cuando el distribuidor no gira, cuando gira a una velocidad de 50 rev/min y cuando gira a una velocidad de 100 rev/min.

$$f_{(x)} = p_1 * x + p_2$$

$$Si: f_{(x)} = 0$$

	p_1	p_2	$Q_{(U_{mf})} \left(\frac{l}{min} \right)$	$U_{mf} \left(\frac{m}{seg} \right)$
Estático	0.48514	-335.2445	690	0.41
Rotando: 50 $\frac{rev}{min}$	0.54839	-344.0923	625	0.37
Rotando: 100 $\frac{rev}{min}$	0.62796	-380.9793	605	0.35

Tabla 7.1.1: Resultados de la velocidad mínima de fluidización para los tres casos. Con distribuidor estático, con distribuidor girando a 50 rev/min y con giro a 100 rev/min.

En la tabla 7.1.1 se ve claramente que la velocidad de mínima fluidización disminuye, lo que significa que si se hace girar el distribuidor se mejora la fluidización ya que cada vez se necesita menor caudal de aire, esto se debe a que la aceleración centrífuga impartida por la rotación del distribuidor provoca la disminución del tamaño inicial de las burbujas que se forman, además la rotación del distribuidor promueve una distribución homogénea de las burbujas sobre la superficie del lecho. Estos resultados concuerdan con los que se adquirieron en los estudios de *Derek Wilkinson (1995)*, *Sobrino C. (2009)* y *Gómez Hernández (2012)*.

7.2 CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DE CONTROL

Como se mencionó anteriormente los estados de control para este estudio se definen haciendo tres experimentos, muy bien diferenciados que consisten en realizar el monitoreo y medición de las fluctuaciones de presión, así como la humedad relativa y la temperatura tanto en el plenum como en el interior del lecho, sin que gire el distribuidor de aire en un primer caso. En un segundo caso se efectúa el mismo experimento pero haciendo que el distribuidor gire a 50 rev/min y como tercer caso se lleva a cabo el mismo experimento solo que ahora el distribuidor se hace girar a 100 rev/min.

A continuación en las gráficas 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3 se presenta los espectrogramas para los casos en los que se realizó las medidas sin que gire el distribuidor, con un giro de 50 rev/min y con un giro de 100 rev/min.



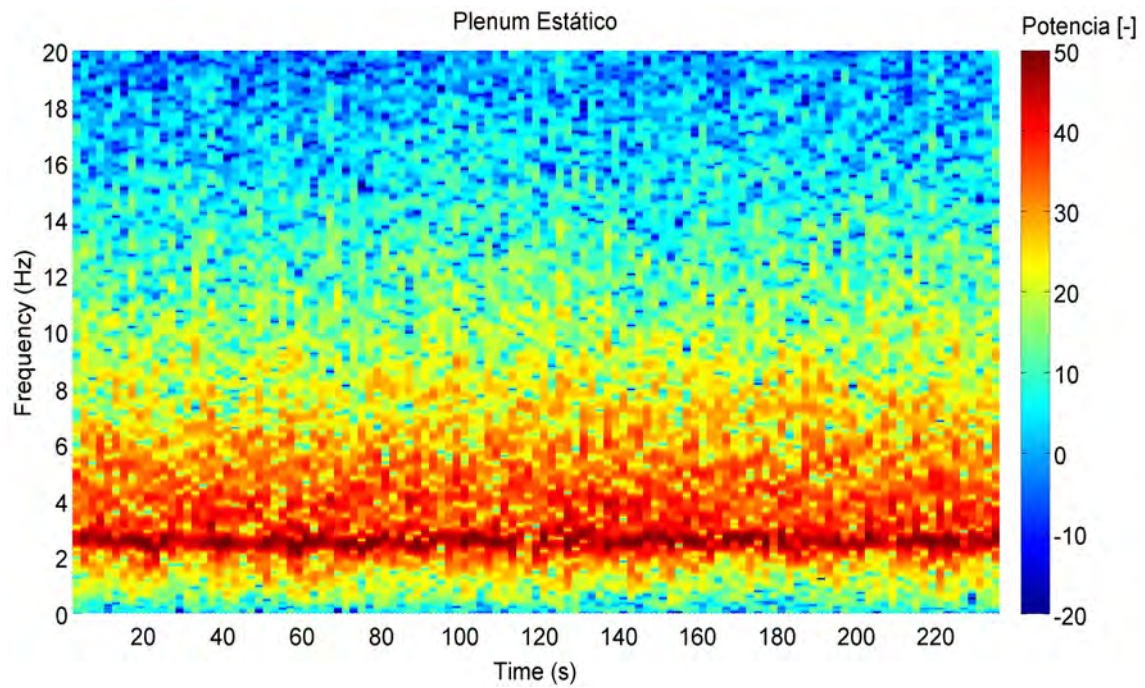


Figura 7.2.1: Vista en 2D del espectrograma en el plenum del lecho seco fluidizando con un caudal de 1100 l/min con el distribuidor estático (sin giro).

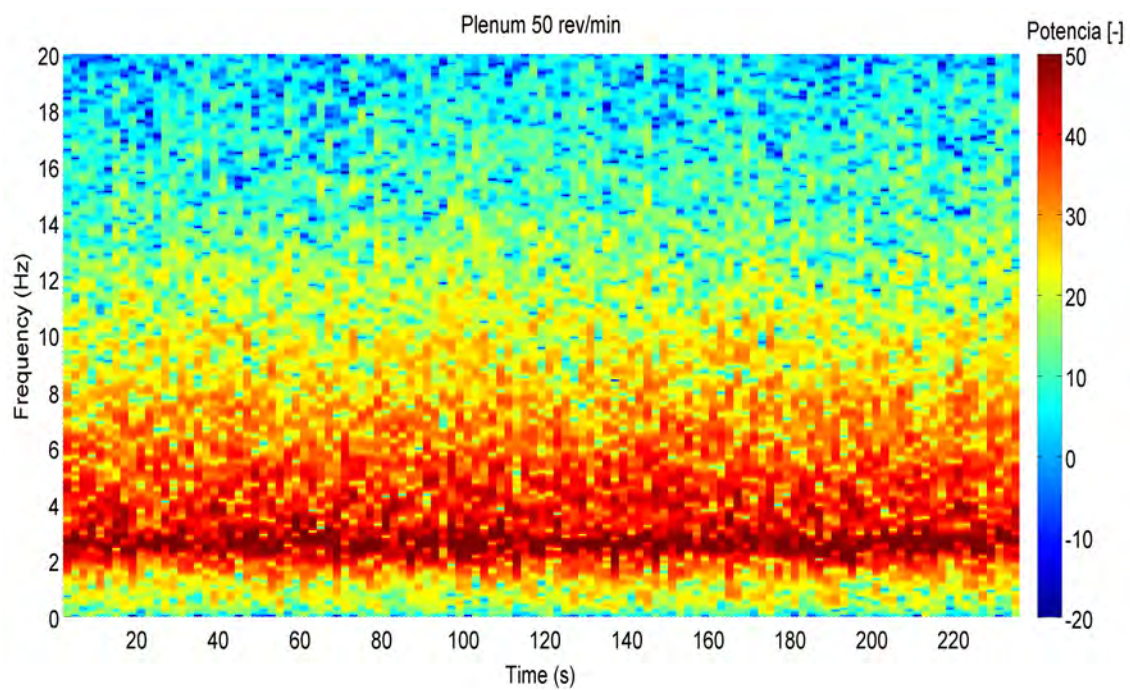


Figura 7.2.2: Vista en 2D del espectrograma en el plenum del lecho seco fluidizando con un caudal de 1100 l/min con el distribuidor girando a 50 rev/min.

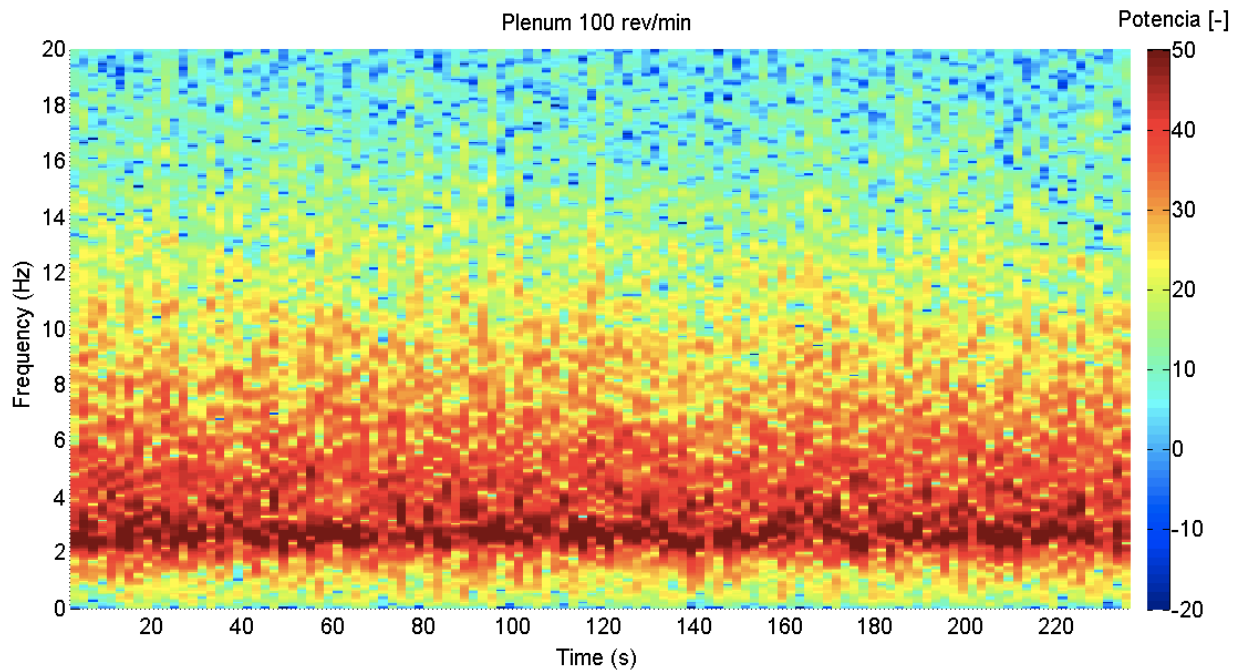


Figura 7.2.3: Vista en 2D del espectrograma en el plenum del lecho seco fluidizando con un caudal de 1100 l/min con el distribuidor girando a 100 rev/min.

Más adelante se verá como afecta la formación de aglomerados en el lecho, en este apartado se observa que trabajando en condiciones normales el comportamiento del lecho tiene una frecuencia característica que casi no varía, ya sea en el caso en el que el distribuidor no gira o si gira con cualquiera de las dos velocidades la frecuencia característica se mantiene en un rango de entre 2 a 4 Hz. Se puede apreciar en la gráfica 7.2.1 que la zona roja es un poco más estrecha y menos marcada que en las figuras 7.2.2 y 7.2.3 donde las zonas rojas son algo más anchas y la línea o zona que señala el rango de frecuencia característica está más marcada, esto aunque aún no arroje resultados precisos ya muestra que el uso de un distribuidor giratorio permite mejorar la fluidización de un lecho.

Si se trabajara con un lecho que posea un diámetro relativamente grande habría que tomar en cuenta que las señales de presión medidas de diferentes lados del lecho pueden producir diferentes frecuencias dominantes en los espectros de potencia, sin embargo para los casos estudiados en este trabajo no se toma en cuenta esta posibilidad ya que la geometría de la instalación con la que se trabaja es considerablemente pequeña.

7.3 ENSAYOS DE AGLOMERACIÓN

Para realizar los ensayo de aglomeración o lo que es lo mismo, hacer la simulación de la formación de aglomerados en el interior del lecho, se procede como se explicó en el capítulo 6. Se trabaja con un caudal de 1100 l/min y con tres volúmenes diferentes (40 ml, 60 ml y 80 ml), cada uno de ellos inyectados durante intervalos de tiempo distintos (1 min, 3 min y 5 min) para los tres casos del distribuidor, es decir, cuando el distribuidor no gira, cuando gira a 50 rev/min y cuando gira a 100 rev/min. Por tanto, se tienen 27 experimentos distintos, con los cuales se estudia el comportamiento del lecho y se establecen los tiempos de defluidización y de regeneración para cada caso. Con el objetivo de que la descripción de los ensayos sea lo más clara posible, a partir de aquí el análisis se centra en tres casos en concreto, que son:

1. Sin que gire el distribuidor y con un caudal de 1100 l/min, a los 4 minutos de iniciadas las mediciones se inyecta un volumen de agua de 60 ml durante un minuto.
2. Con un giro de 50 rev/min y con el mismo caudal de 1100 l/min, luego de que hayan transcurrido 4 minutos de iniciado el ensayo se procede nuevamente a inyectar un volumen de agua de 60 ml durante un minuto.
3. El tercer caso sería hacer lo mismo que en los dos casos anteriores, con la salvedad de que ahora el distribuidor se hace girar a 100 rev/min.

7.3.1 Análisis de las señales de presión, humedad y temperatura.

De todos los casos posibles se han elegido estos tres ya que son los más significativos dado que por la rapidez con la que se inyecta el agua se aprecia claramente como se forman los aglomerados en el interior del lecho. Esto también es apreciable cuando se inyectan los 40 ml o los 80 ml en un minuto, así que para resumir se analiza solo los tres casos expuestos anteriormente, aunque al final del capítulo, en la tabla 7.3.1 se presenta un resumen de los resultados de todos los casos.

De igual forma que todos los estudios que se realizaron con los diferenciales de presiones se centraron en el plenum, ahora que se van a analizar los valores medidos de temperatura y de humedad relativa, los estudios se centran en el interior del lecho ya que ahí es donde se van a registrar mayores fluctuaciones.

A continuación en la figura 7.3.1 se presentan los resultados de la humedad relativa y la temperatura versus el tiempo, que se midieron tanto en el plenum como en el interior del lecho.



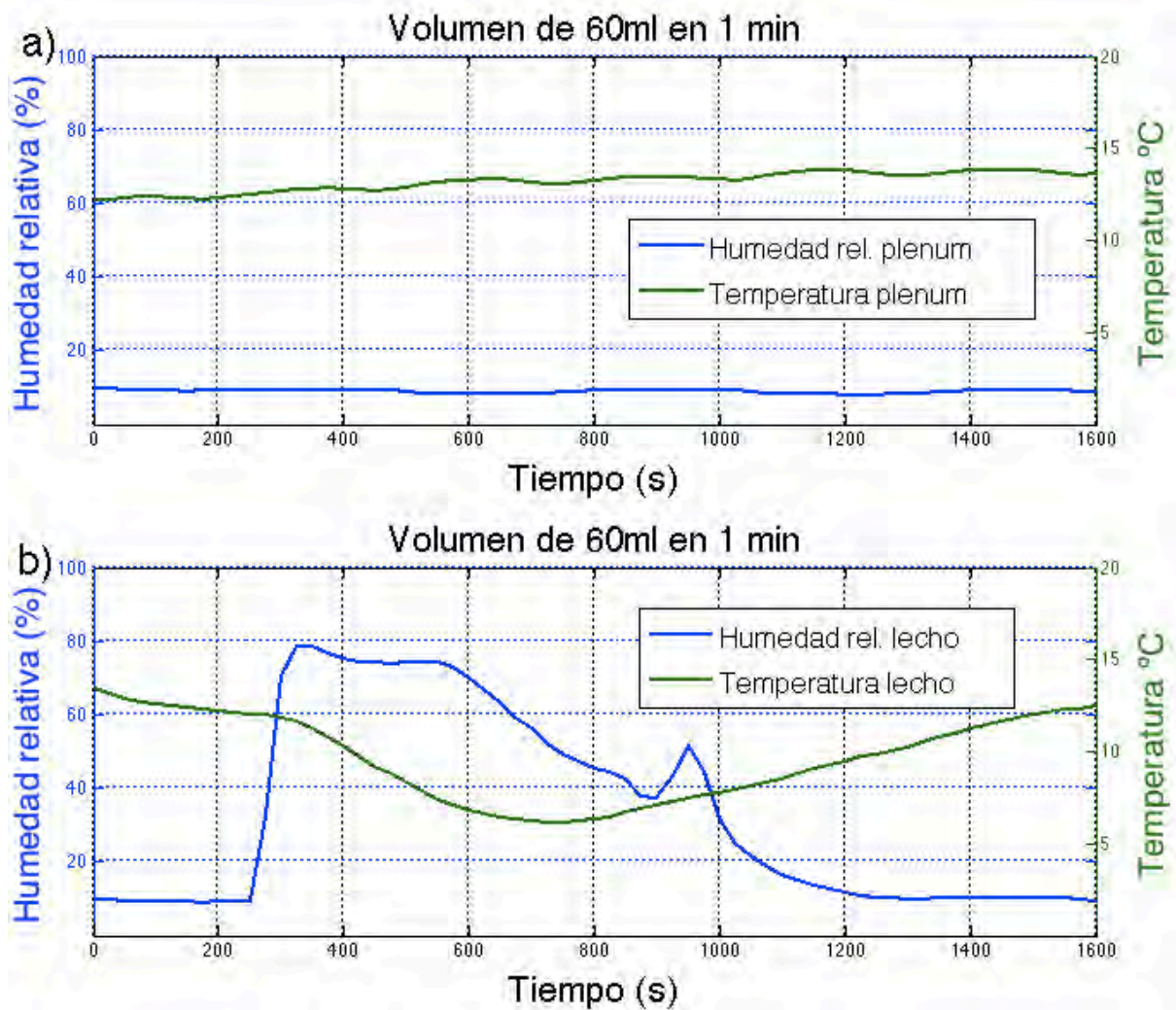


Figura 7.3.1: Medición de la temperatura y la humedad relativa en: (a) plenum y en (b) interior del lecho, cuando se inyectan 60 ml durante un minuto, sin que el distribuidor gire.

En la figura 7.3.1-a se puede observar que en el eje horizontal se representa el tiempo, y que en el eje vertical de la izquierda está la humedad relativa, mientras que en el eje vertical de la derecha se coloca la temperatura, así se puede ver que la humedad relativa en el plenum durante todo el tiempo que dura el ensayo se mantiene alrededor del 8 % y que la temperatura también se mantiene a un promedio de 14 °C.

Esto es de esperar ya que al inyectar el agua en el interior del lecho son las partículas sólidas las que se mojan y por tanto es en el lecho donde van a variar la humedad relativa y la temperatura. Así queda demostrado ya que en la figura 7.3.1-b se aprecia que en el momento en el que se inyecta el agua la temperatura empieza a descender desde unos 14 °C hasta alcanzar una temperatura de unos 6 o 7 °C y la humedad relativa se dispara desde un 8 % hasta alcanzar casi un 80 %. Con el transcurso del tiempo se puede ver que el agua que se introdujo en el lecho se va secando y por tanto la temperatura y la humedad relativa del lecho van recuperando nuevamente sus valores iniciales.

En la figura 7.3.2 se presentan la gráfica de la desviación típica versus el tiempo y la gráfica de la frecuencia versus el tiempo, bajo las mismas condiciones que se explicaron anteriormente, es decir con el lecho fluidizando con un caudal de aire de 1100 l/min, sin girar el distribuidor y con un volumen de agua inyectado de 60 ml trascurridos 4 minutos de iniciado el ensayo.

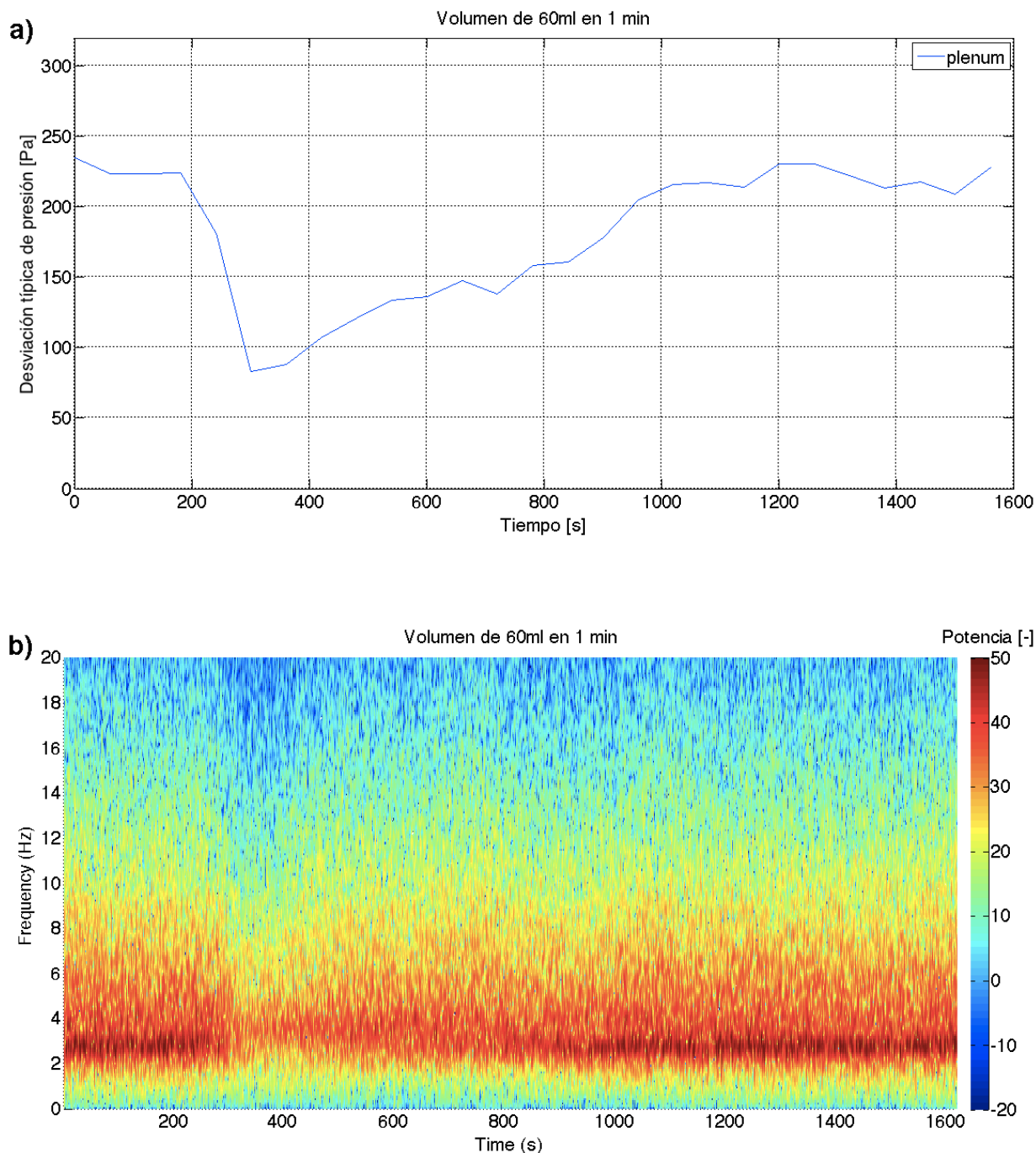


Figura 7.3.2: a) desviación típica versus tiempo, b) espectrograma o PSD. Cuando el caudal de aire es de 1100 l/min y sin que el distribuidor gire se inyectan 60 ml durante un minuto.

En la figura 7.3.2-a se presentan las señales medidas en el plenum ya que como se mencionó en capítulos anteriores el análisis se centra en esta zona y se puede observar claramente que en el minuto 4 que es cuando se inyecta el agua la desviación típica de la señal de presión empieza a descender, lo cuál indica que se empieza a perder la capacidad del lecho para fluidizar debido a que las partículas se han mojado y formado los aglomerados que impiden la correcta fluidización.

A partir del minuto 6 se aprecia que la desviación vuelve a incrementarse, lo que indica que las partículas se están secando y por consiguiente el lecho está volviendo a recuperar su calidad de fluidización.

En la figura 7.3.2-b se aprecia el espectrograma de la señal en el plenum con la mismas características ya mencionadas anteriormente y se aprecia que la zona o franja horizontal de color rojo que representa la frecuencia característica que se encuentra entre 2 y 4 Hz tiene un leve estrechamiento y atenuación a los 360 segundos es decir casi a los 6 minutos, lo cual indica que es en esta zona donde el lecho deja de fluidizar. Superado este tiempo se nota como la franja de color rojo vuelve a ensancharse y progresivamente vuelve a tener un color rojo intenso, lo que implica que el lecho vuelve a fluidizar y por tanto vuelve a tener su frecuencia característica.

A continuación en la figura 7.3.3 se presentan las gráficas de la temperatura y la humedad relativa en el plenum y en el interior del lecho versus el tiempo, cuando se inyectan 60 ml durante un minuto, con el distribuidor girando a 50 rev/min, con el fin de estudiar el efecto del giro del distribuidor sobre este proceso de aglomeración.



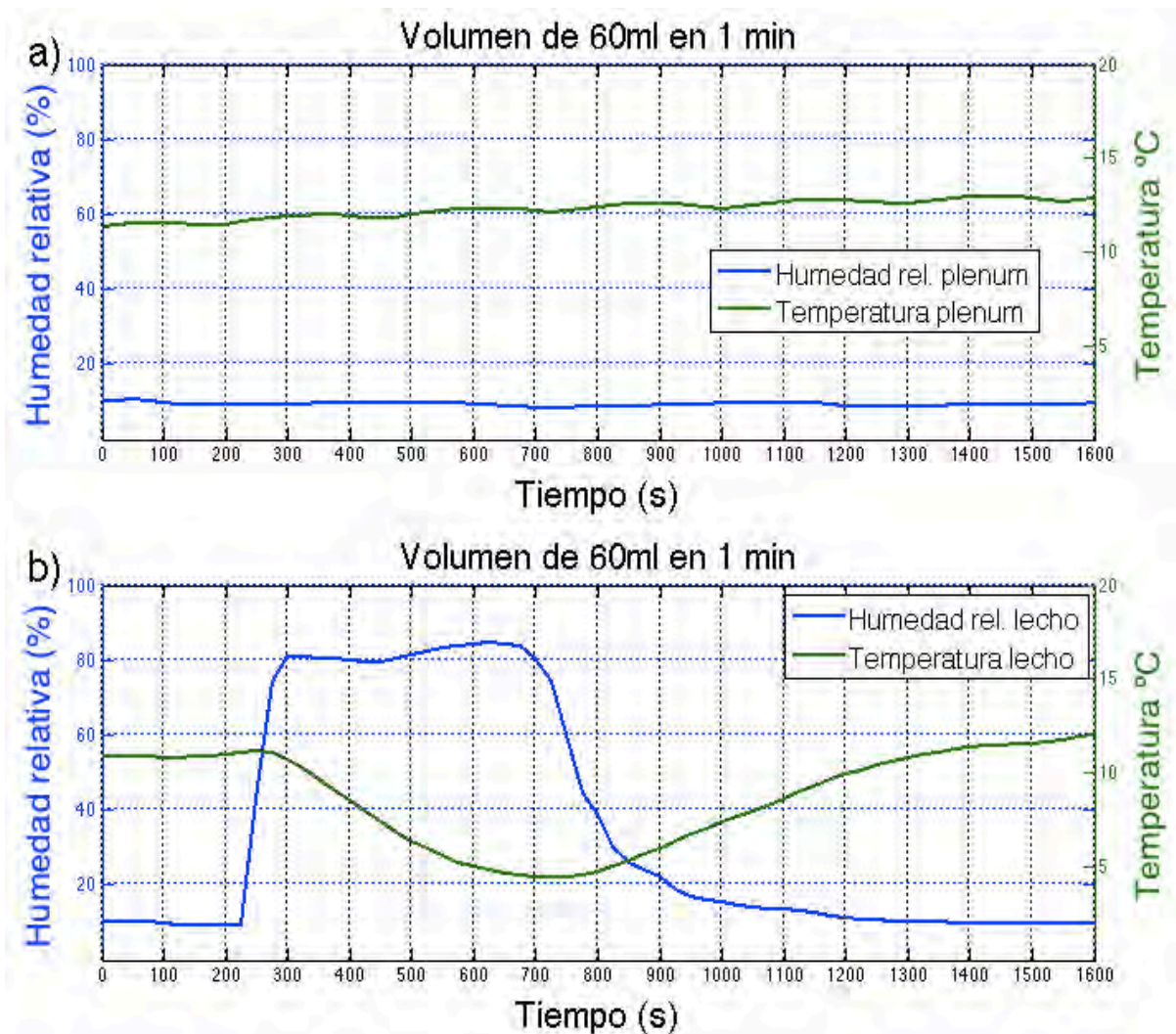


Figura 7.3.3: Medición de la temperatura y la humedad relativa en: (a) plenum y en (b) interior del lecho, cuando se inyectan 60 ml durante un minuto, con el distribuidor girando a 50 rev/min.

En la figura 7.3.3 se observa que el plenum nuevamente se tiene una temperatura prácticamente constante de 12 o 13°C y una humedad relativa de un 10% aproximadamente. De igual forma que antes, en el minuto 4 que es cuando se inyectan los 60 ml de agua, la temperatura empieza a descender hasta llegar a unos 4°C mientras que la humedad relativa se ha incrementado hasta alcanzar un valor del 80%, es aquí donde nuevamente el lecho vuelve a iniciar la defluidización. A partir de los 700 segundos más o menos los valores de temperatura y de humedad relativa tienden a subir y bajar respectivamente hasta volver a tener los valores iniciales de 12 ó 13°C y una humedad del 10%.

La diferencia de que el distribuidor esté estático o que gire a 50 rev/min, es que a pesar de que los ensayos duran aproximadamente el mismo tiempo (26 o 27 minutos aproximadamente) en el primer caso los valores de temperatura y humedad relativa al final del ensayo no vuelven a recuperar los mismos valores iniciales, es decir que no

se seca del todo el agua que se inyectó. En el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min el ensayo dura algo menos y sus valores finales de temperatura y humedad relativa llegan a tener el mismo valor que al inicio del ensayo.

Este mismo experimento es analizado mediante la desviación típica y el espectrograma que se presentan en la figura 7.3.4 donde el lecho está fluidizando con un caudal de aire de 1100 l/min, con el distribuidor de aire girando a 50 rev/min y con un volumen de agua de 60 ml que se inyectó a los 4 minutos de iniciado el ensayo.

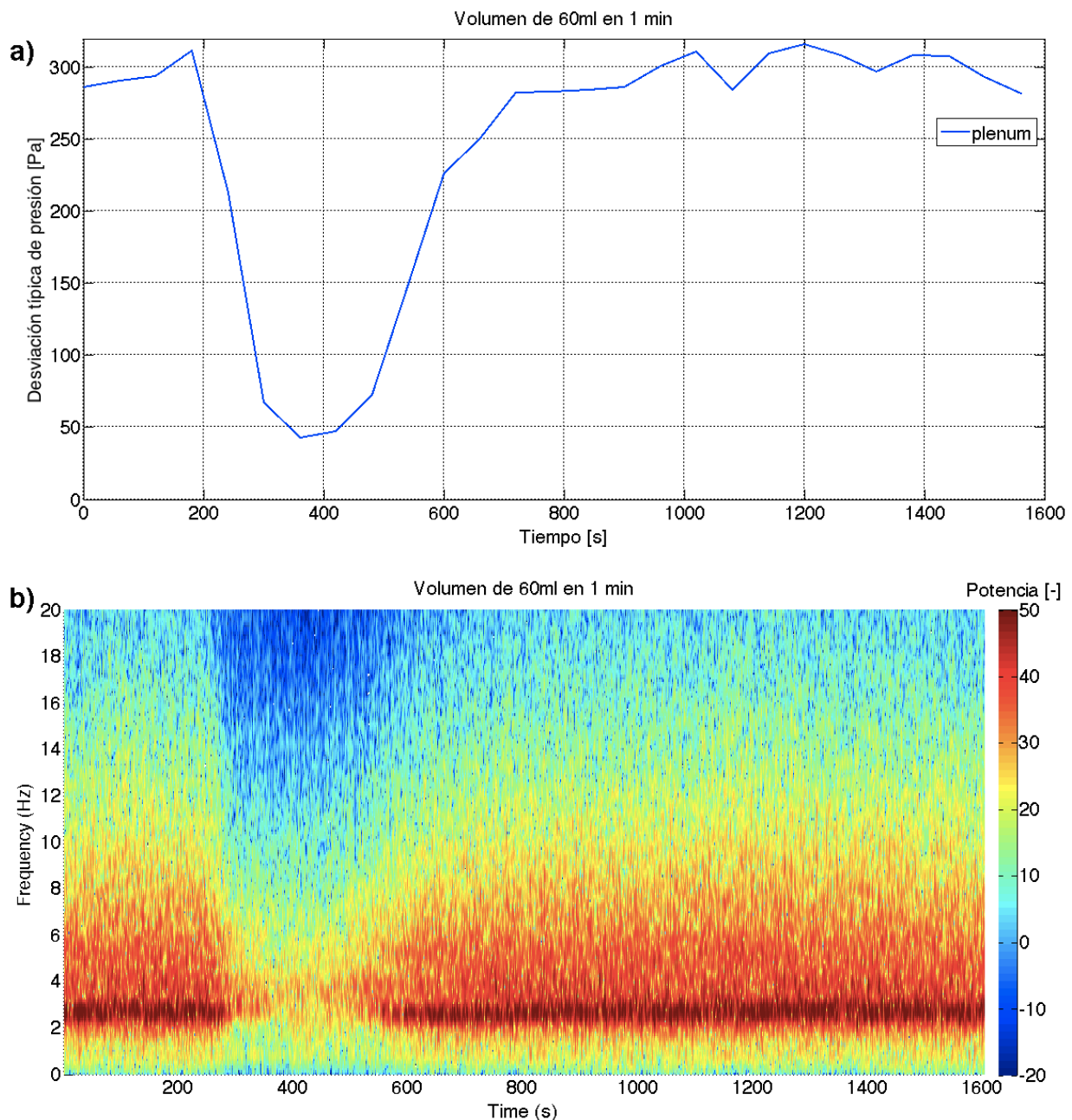


Figura 7.3.4: a) desviación típica versus tiempo, b) espectrograma o PSD. Cuando el caudal de aire es de 1100 l/min y el distribuidor gira a 50 rev/min, se inyectan 60 ml durante un minuto.

En este caso el distribuidor gira a 50 rev/min, en la figura 7.3.4-a se observa que el descenso de la desviación típica aparece a partir de los 4 minutos aproximadamente y la caída es mucho más vertiginosa, esto se debe a que el giro del distribuidor se encarga de que las partículas que se han mojado vayan moviéndose en todo el interior del lecho, por lo que se han formado pequeños aglomerados que se han distribuido en toda la superficie, pero a la vez el giro del distribuidor impide que estos se depositen en el fondo o en las paredes del lecho y es por este motivo que el ascenso de la desviación típica también es muy vertiginoso ya que el giro del distribuidor hace que las partículas de arena se muevan más y por tanto se sequen más rápido, con lo cuál se consigue fluidizar el lecho nuevamente pero en menor tiempo.

En la figura 7.3.4-b se presenta el espectrograma del segundo caso analizado, en el que se puede ver que desde los 240 segundos, hasta los 550 segundos, se aprecia una interrupción o salto en la franja de color rojo, lo cuál es signo de que en este intervalo de tiempo el lecho perdió su capacidad de fluidizar y solo después de los 500 segundos el lecho fue capaz de refluidizarse. Además se puede ver que el salto o discontinuidad de la frecuencia característica en este caso es mucho más marcado ya que como los pequeños aglomerados que se han formado se han distribuido por todo el interior del lecho, esto ha provocado una defluidización importante, cosa que no sucedió en el caso en el que el distribuidor no giraba, ya que los aglomerados que se formaron en ese caso tendían a depositarse solo en ciertas zonas del lecho.

Como tercer y último caso en la figura 7.3.5 se presenta la gráfica de la temperatura y la humedad relativa en el plenum y en el interior del lecho versus el tiempo, así como en la figura 7.3.6 se puede apreciar la desviación típica versus el tiempo y el espectrograma correspondientes al caso en el que se inyectan 60 ml durante un minuto, con el distribuidor girando a 100 rev/min.



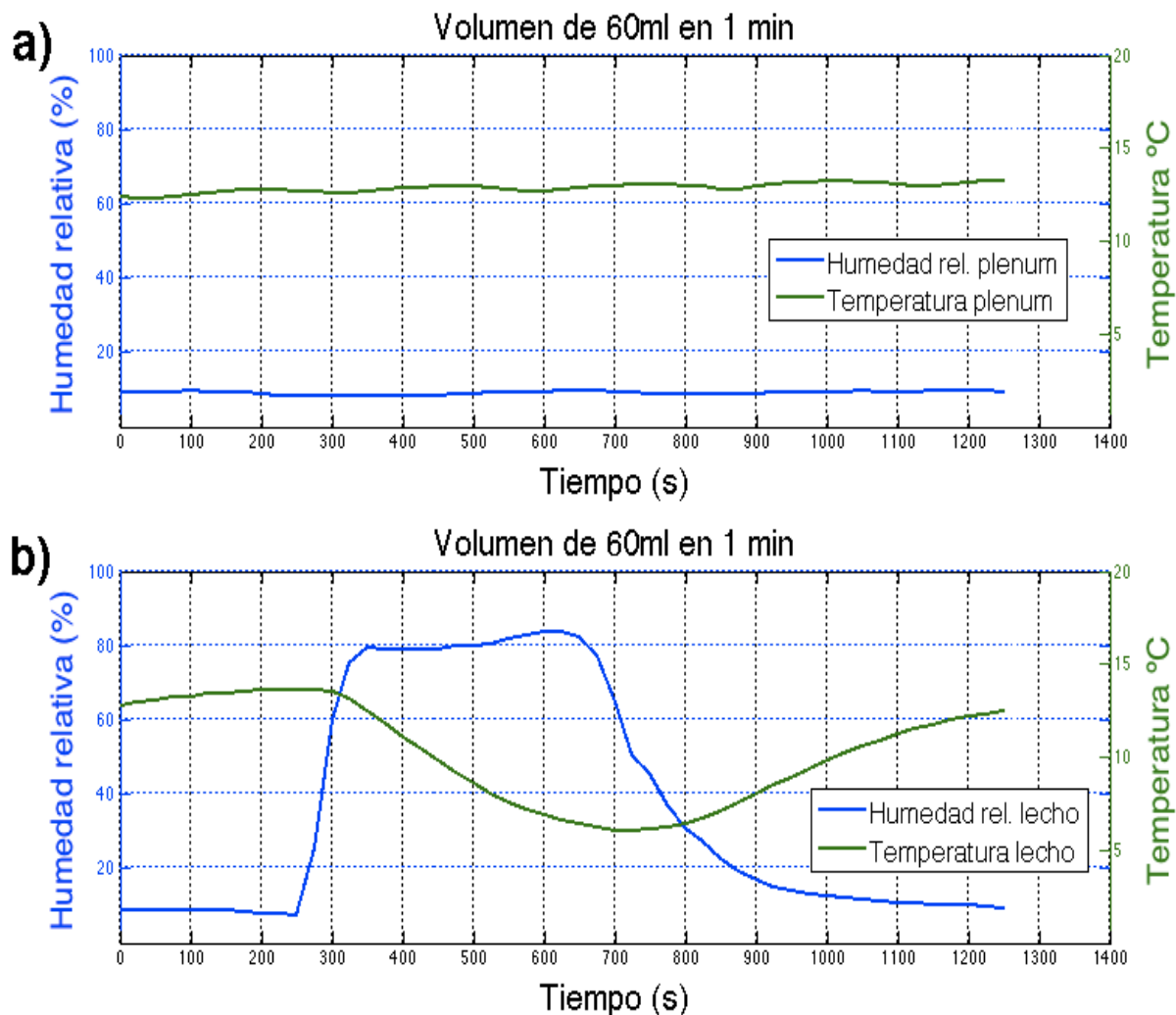


Figura 7.3.5: Medición de la temperatura y la humedad relativa en: (a) plenum y en (b) interior del lecho, cuando se inyectan 60 ml durante un minuto, con el distribuidor girando a 100 rev/min.

Una vez más se ve que la temperatura que tiene un valor de unos 12 °C aproximadamente y la humedad relativa que alcanza un 8 % más o menos son prácticamente constantes en el plenum. En cambio en el interior del lecho se observa que a partir de los 240 segundos que es cuando se inyectó los 60 ml de agua, la temperatura empieza a descender hasta llegar a un valor mínimo de unos 6 °C y posteriormente vuelve a subir hasta recuperar su valor inicial. También sucede algo similar con la humedad relativa ya que en el momento en el que se inyecta el agua la humedad relativa aumenta prácticamente de golpe su valor hasta un 82 % y poco a poco vuelve a tener su valor inicial.

En este tercer ensayo sucede prácticamente lo mismo que en los anteriores, solo que como ahora el distribuidor de aire gira más rápido, esto permite que la arena se seque antes y por lo tanto se puede afirmar que el lecho se vuelve a fluidizar más rápido que en los casos anteriores. En la figura 7.3.5-a se puede mirar como la temperatura y la humedad relativa en el plenum vuelven a tener sus valores iniciales antes de los 1300 segundos.

En la figura 7.3.6 se presenta la gráfica de la desviación típica versus el tiempo, así como el espectrograma, correspondientes al caso en que se trabaja con un caudal de aire de 1100 l/min, se inyectan 60 ml durante un minuto y el distribuidor gira a 100 rev/min.

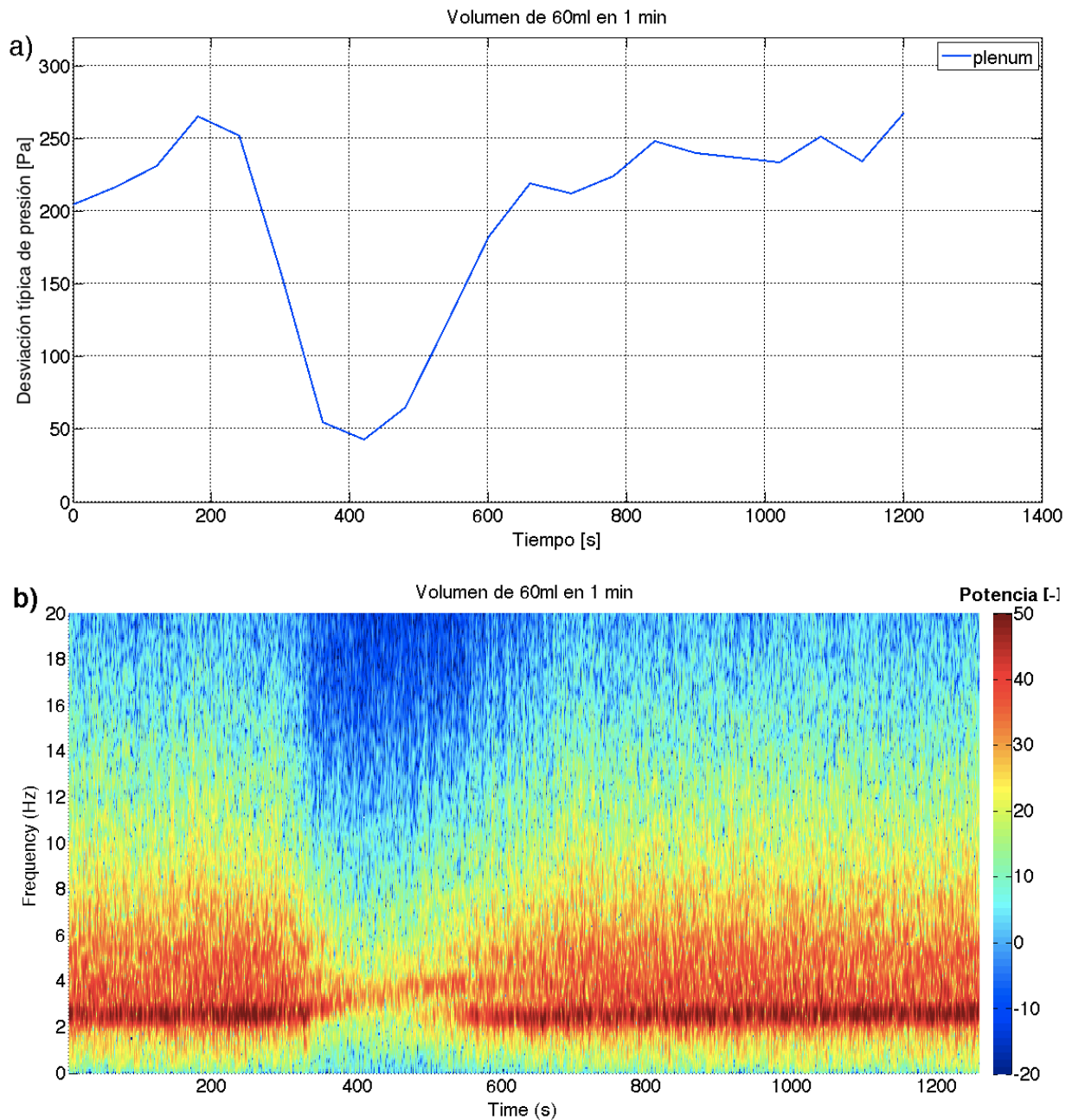


Figura 7.3.6: a) Desviación típica versus tiempo, b) espectrograma o PSD. Cuando el caudal de aire es de 1100 l/min y el distribuidor gira a 100 rev/min, se inyectan 60 ml durante un minuto.

En la gráfica 7.3.6-a se puede apreciar claramente que la señal tiene prácticamente el mismo comportamiento que en el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min, solo que ahora el ensayo termina a los 1200 segundos, es decir que con un giro más rápido del distribuidor la arena se ha secado antes.

En el espectrograma de la figura 7.3.6-b al igual que en los otros casos, desde los 300 segundos hasta aproximadamente los 550 segundos hay un salto o discontinuidad de la franja roja que representa la frecuencia característica, solo que ahora dicho estrechamiento ya no es tan marcado, ni amplio como antes. Esto se debe a que como ahora el distribuidor gira mucho más rápido que antes impide con mayor eficiencia la formación de aglomerados y es por ello que se vuelve a tener la misma frecuencia característica de 2 Hz, solo que ahora se la consigue en menos tiempo.

7.3.2 Cantidad de agua secada

En este apartado se exponen los resultados de los tiempos de defluidización y de regeneración que se obtienen mediante el tratamiento de las gráficas de desviación típica versus el tiempo, así como los resultados de los tiempos de secado del agua inyectada en los diferentes casos. Al final se construyen dos tablas donde se recopila los resultados de los tiempos de defluidización, de regeneración y de secado para los 27 casos posibles.

Para este estudio, se realiza un balance de masa para determinar la cantidad de agua secada al final de un ensayo, es decir que si hemos inyectado 40 ml ya sea en 1 minuto, en 3 minutos o en 5 minutos, al final el resultado debe ser que se han secado 40 ml.

En este análisis también se presentan los 3 casos que se analizaron anteriormente de los 27 posibles, es decir que en el lecho que está fluidizando con un caudal de 1100 l/min se han inyectado 40 ml de agua durante un minuto en tres situaciones distintas que son: sin giro del distribuidor, con giro de 50 rev/min y con giro de 100 rev/min.

En la figura 7.3.7 se expone los resultados del primer caso, en el que el distribuidor de aire no gira.



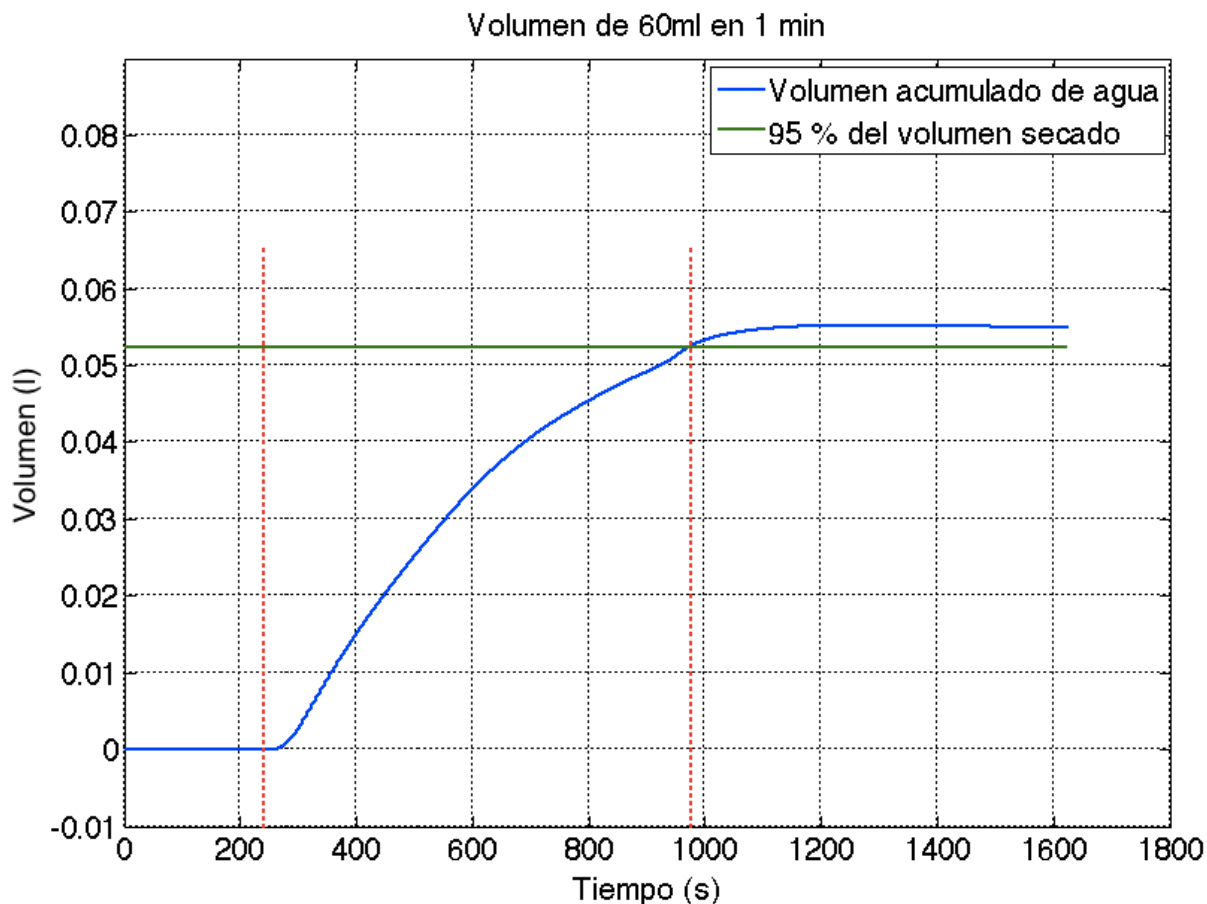


Figura 7.3.7: Volumen secado versus el tiempo, sin que gire el distribuidor de aire.

En este primer caso se puede visualizar dos líneas verticales de color rojo, la que está a la izquierda es la que señala el minuto 4 que es cuando se inyecta el agua, la otra línea que está a la derecha indica el 95 % del punto máximo de la curva o lo que es lo mismo indica el 95 % del máximo de agua que se ha secado. Para este caso se ha registrado que el tiempo de secado es de 12,27 minutos y se han secado 54 ml de agua. Este resultado es aceptable ya que cumple con las condiciones explicadas anteriormente.

A continuación se presenta la figura 7.3.8 donde se aprecia la cantidad de agua secada y el tiempo que toma secarla para el segundo caso donde el distribuidor de aire gira con una velocidad de 50 rev/min.

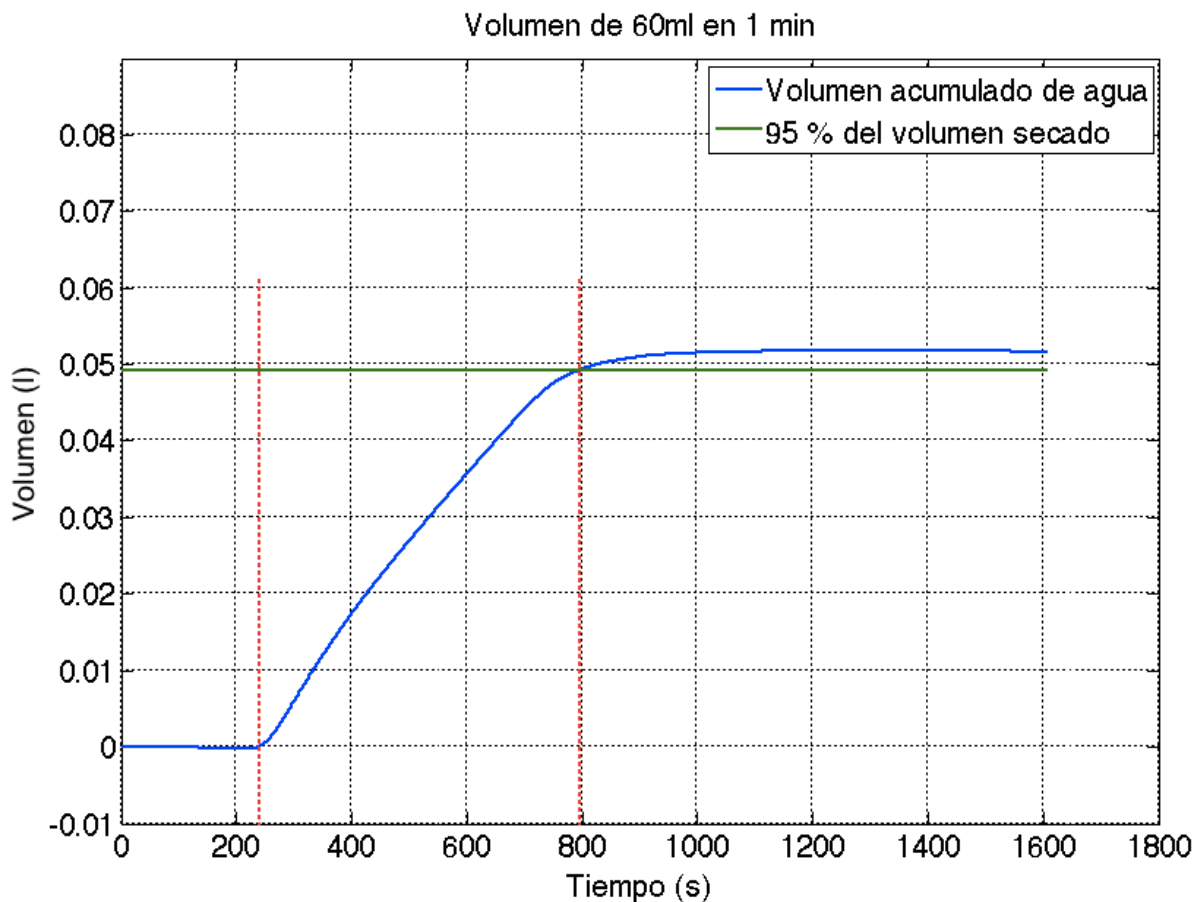


Figura 7.3.8: Volumen secado versus el tiempo, con el distribuidor de aire girando a una velocidad de 50 rev/min.

En este segundo caso se puede apreciar que la línea de la derecha señala el punto del 95% del máximo de la curva, o lo que es lo mismo, el 95% del máximo volumen que se ha secado hasta ese momento. El tiempo de secado registrado en este caso es de 9,28 minutos, y el volumen secado fue de 49,6 ml.

Como último caso se expone la figura 7.3.9 donde se aprecia la cantidad de agua secada y el tiempo que toma secarla para el caso donde el distribuidor de aire gira con una velocidad de 100 rev/min.

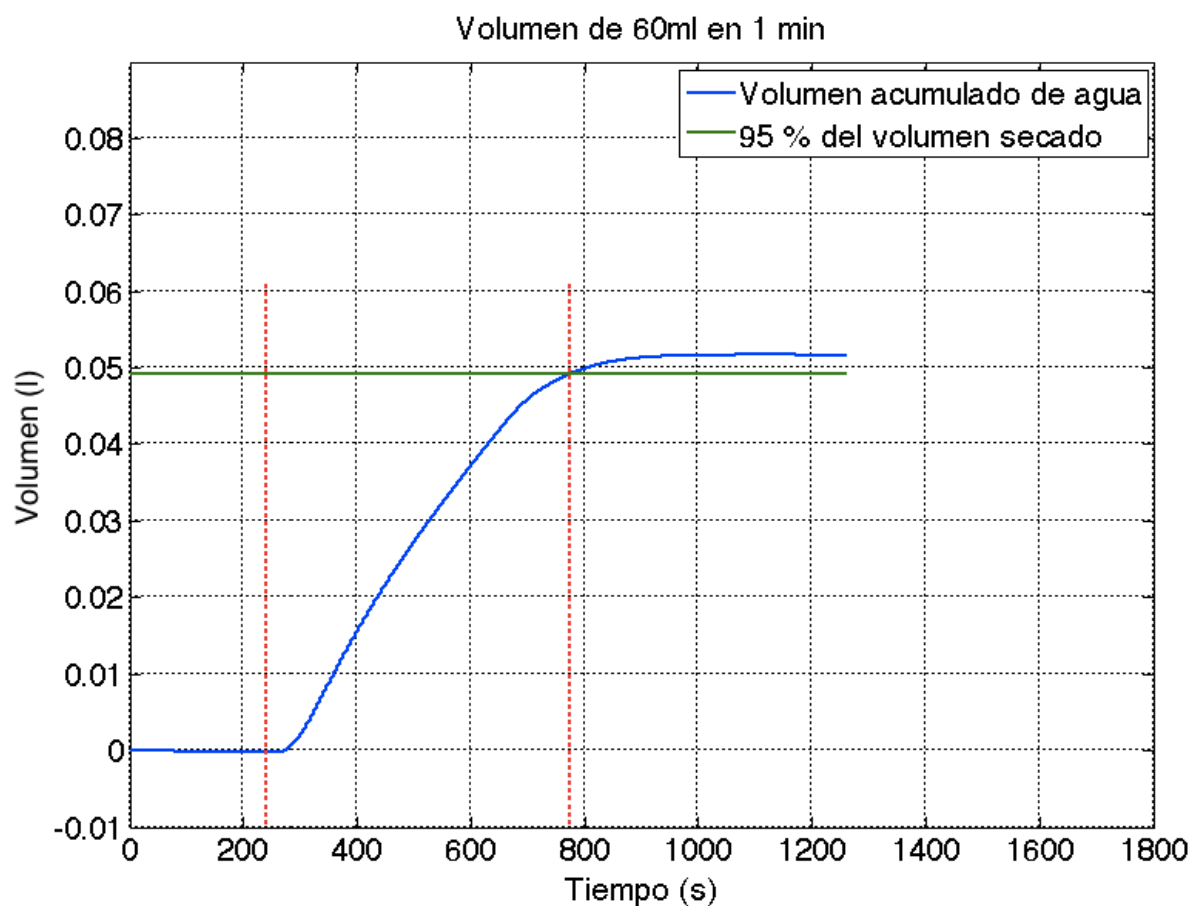


Figura 7.3.9: Volumen secado versus el tiempo, con el distribuidor de aire girando a una velocidad de 100 rev/min.

En este último caso se ve que la línea de color rojo que marca el 95 % de la cantidad máxima de volumen secado arroja un resultado de 49,3 ml secados en un tiempo de 8,89 minutos.

A continuación se presenta en la tabla 7.3.1 los resultados de los tiempos de secado de los 27 casos posibles que se analizaron.

<i>Tiempos de secado</i>			
	<i>Estático</i>	<i>Giro 50 rpm</i>	<i>Giro 100 rpm</i>
<i>40 ml - 1 min</i>	10,53	10,03	8,18
<i>40 ml - 3 min</i>	9,30	7,67	6,54
<i>40 ml - 5 min</i>	6,48	6,27	5,07
<i>60 ml - 1 min</i>	16,73	12,96	12,83
<i>60 ml - 3 min</i>	14,78	12,30	12,05
<i>60 ml - 5 min</i>	9,70	8,90	8,16
<i>80 ml - 1 min</i>	20,30	19,72	12,46
<i>80 ml - 3 min</i>	12,80	11,05	10,25
<i>80 ml - 5 min</i>	11,70	10,27	9,83

Tabla 7.3.1: Resultados de los tiempos de secado.

Analizando la tabla 7.3.1 de forma global se puede ver que a medida que se aumentan los volúmenes de agua y los tiempos de inyección, también hay una tendencia a incrementarse los tiempos de secado, esto no se cumple en su totalidad ya que hay varios factores que intervienen en el secado del agua como puede ser la humedad relativa y la temperatura del ambiente en el día que se realizó los ensayos, así como la duración de los ensayos ya que no todos duraron lo mismo porque el punto de referencia para terminar un ensayo es que la humedad relativa del lecho y del plenum vuelvan a ser semejantes, es decir que no siempre se esperó a que estos dos valores de humedad vuelvan a ser exactamente los mismos.

Otra tendencia que se puede apreciar en la tabla 7.3.1 es que los tiempos de secado cuando el distribuidor gira a 100 rev/min son mucho menores que cuando el distribuidor gira a 50 rev/min o cuando el distribuidor no gira. Esto es de esperarse ya que al tener más movimiento las partículas tienden a secarse más rápido, pero hay que decir que esto no se cumple en la totalidad de los casos ya que también otro efecto de que haya mucho movimiento de la arena, es que los aglomerados que se forman se mezclan mejor y por tanto tienden a humedecer más cantidad de partículas, por lo que en algunos casos pese a que el distribuidor gira más rápido, el tiempo de secado es más de lo esperado. Lo que si se puede afirmar es que aunque el tiempo de secado sea un poco mayor en algunos casos, el hecho de que el distribuidor gire más rápido hace que la arena se mezcle mejor y su secado sea más uniforme y mas eficiente.



En la tabla 7.3.2 se muestran los tiempos de defluidización y de regeneración para todos los casos ensayados. Estos tiempos se obtuvieron tal y como se explicó en el capítulo 6, mediante la determinación de la **desviación típica límite**.

Tiempos de Defluidización y de Regeneración				
		Estático	Giro 50 rpm	Giro 100 rpm
40 ml – 1 min	Defluidización (min)	1,52	0	2,35
	Regeneración (min)	4,89	0	4,47
40 ml – 3 min	Defluidización (min)	0	0	0
	Regeneración (min)	0	0	0
40 ml – 5 min	Defluidización (min)	0	0	0
	Regeneración (min)	0	0	0
60 ml – 1 min	Defluidización (min)	1,01	1,15	1,68
	Regeneración (min)	11,44	9,35	8,78
60 ml – 3 min	Defluidización (min)	1,88	2,65	3,33
	Regeneración (min)	9,93	8,00	7,50
60 ml – 5 min	Defluidización (min)	3,34	4,03	5,43
	Regeneración (min)	8,74	7,11	6,80
80 ml – 1 min	Defluidización (min)	1,03	1,27	1,39
	Regeneración (min)	12,60	11,35	10,36
80 ml – 3 min	Defluidización (min)	2,02	2,24	2,68
	Regeneración (min)	9,80	9,50	8,92
80 ml – 5 min	Defluidización (min)	2,07	3,68	5,29
	Regeneración (min)	9,30	9,03	8,04

Tabla 7.3.2: Resultados de los tiempos de defluidización y de regeneración de los 27 casos posibles de haber inyectado 40, 60 y 80 ml, durante 1, 3 y 5 minutos con el distribuidor estático, con un giro de 50 rev/min y con un giro de 100 rev/min.



De la tabla 7.3.2 se puede deducir que 40 ml inyectados en 3 y en 5 minutos no son casos en los que el lecho llega a tener una completa defluidización ya que al ser un volumen de agua muy pequeño y al ser inyectado tan lentamente, casi no se forman aglomerados que representen un problema para una buena fluidización. En el caso de inyectar 40 ml en 1 minuto si que se registra una defluidización considerable del lecho ya que el tiempo de inyección es muy corto y por tanto si se forman aglomerados.

Tratándose del caso en el que el distribuidor de aire gira a 50 rev/min, los 40 ml ya sean inyectados en 1, 3 o 5 minutos, no registran defluidizaciones importantes ya que a causa del giro y de que se trata de un volumen pequeño de agua, se impide que haya formación de aglomerados en el interior del lecho.

Cuando el distribuidor de aire gira a 100 rev/min se puede apreciar que el primer caso, es decir los 40 ml inyectados en un minuto si causan un efecto importante en la defluidización del lecho. Esto se debe a que ahora el distribuidor gira mucho más rápido y como el agua también es inyectada muy rápidamente, lo que sucede es que las partículas que se mojan se mueven mucho más y por tanto algunas llegan a formar pequeños aglomerados que se logran posar en el fondo o en las paredes del lecho, produciendo una considerable defluidización. Si se analiza el caso del distribuidor girando a 100 rev/min, tanto si se inyecta 40 ml en 3 minutos o en 5 minutos el resultado es que no hay formación de aglomerados que puedan afectar a la fluidización ya que ahora el distribuidor gira mucho mas rápido y el tiempo de inyección en cualquiera de los dos casos es muy extenso.

A parte de estas peculiaridades que se han mencionado en los párrafos anteriores, se puede afirmar que entre más rápido se inyecte el agua, mayor será la cohesividad que haya entre las partículas, por lo que será mayor el tamaño de los aglomerados que se formen y por tanto será mayor el tiempo que requiera el lecho para regenerarse.

7.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS

A continuación se presenta en las figuras 7.4.1, 7.4.2 una representación gráfica de la tendencia a incrementarse los tiempos de secado y regeneración respectivamente.



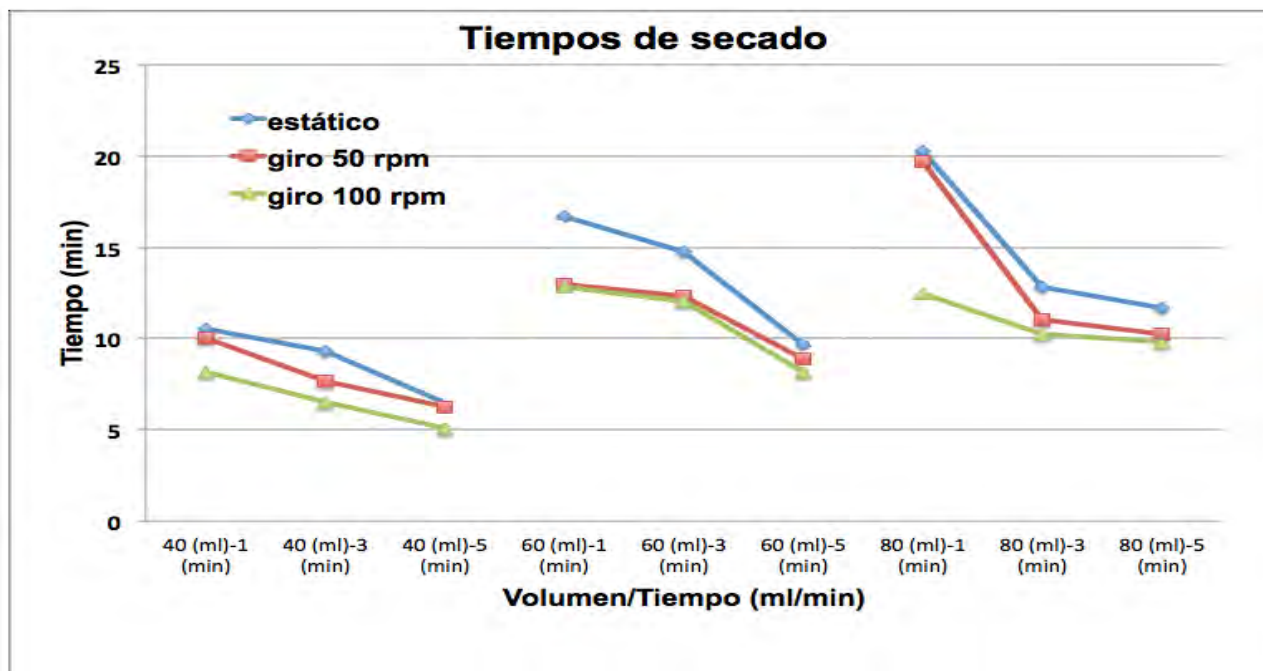


Figura 7.4.1: Tiempos de secado para los casos en los que, (a) el distribuidor de aire no gira, (b) el distribuidor de aire gira a 50 rev/min y (c) el distribuidor gira a 100 rev/min.

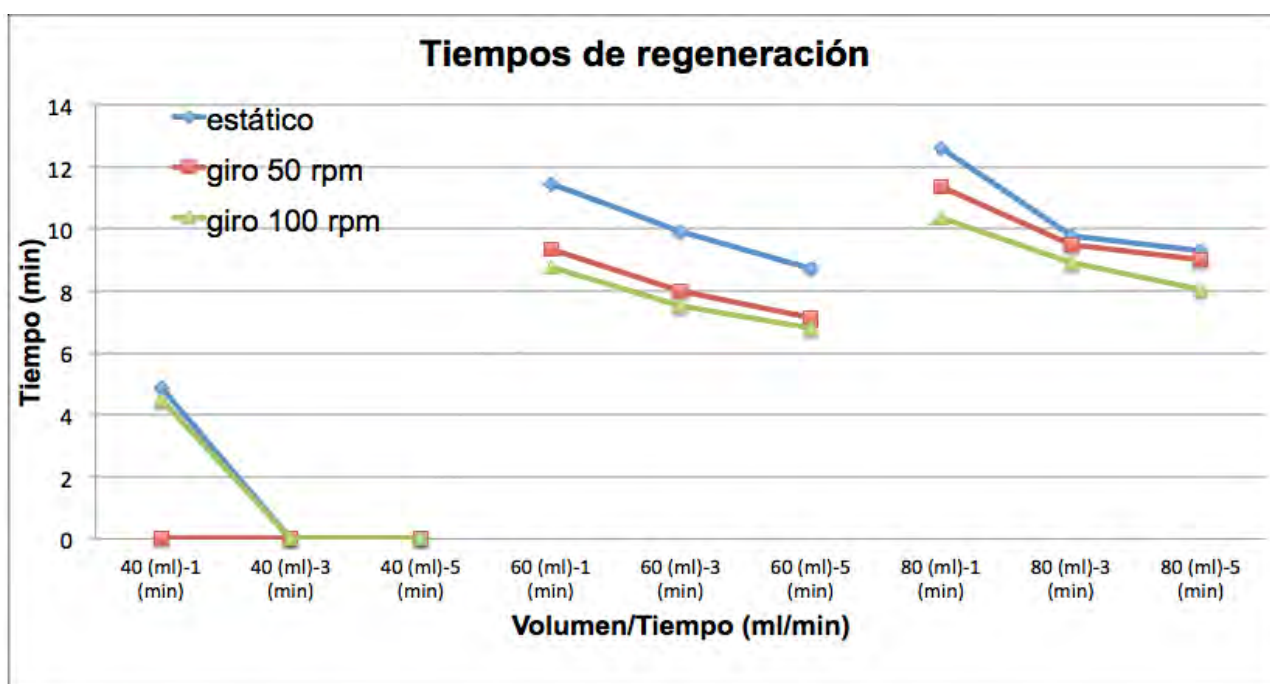


Figura 7.4.2: Tiempos de regeneración para los casos en los que, (a) el distribuidor de aire no gira, (b) el distribuidor de aire gira a 50 rev/min y (c) el distribuidor gira a 100 rev/min.

Tanto si se trata de los tiempos de secado o de los tiempos de regeneración se aprecia claramente que en ambos casos, existe una tendencia a incrementarse los tiempos a medida que el volumen inyectado es mayor y el tiempo de inyección es corto, pero a pesar de esto es interesante observar que bajo las mismas condiciones,

si se hace girar el distribuidor de aire a 50 rev/min se consigue reducir tanto los tiempo de secado como los de regeneración.

Si se aumenta la velocidad de giro del distribuidor a 100 rev/min es más notoria la disminución de los tiempos de secado y de regeneración por lo que se puede afirmar que el giro del distribuidor si mejora la fluidización del lecho.

En las figuras, 7.4.3, 7.4.4, 7.4.5 se hace una comparación entre los tiempos de secado y de regeneración para los casos en los que el distribuidor de aire no gira, gira a 50 rev/min y gira a 100 rev/min respectivamente.

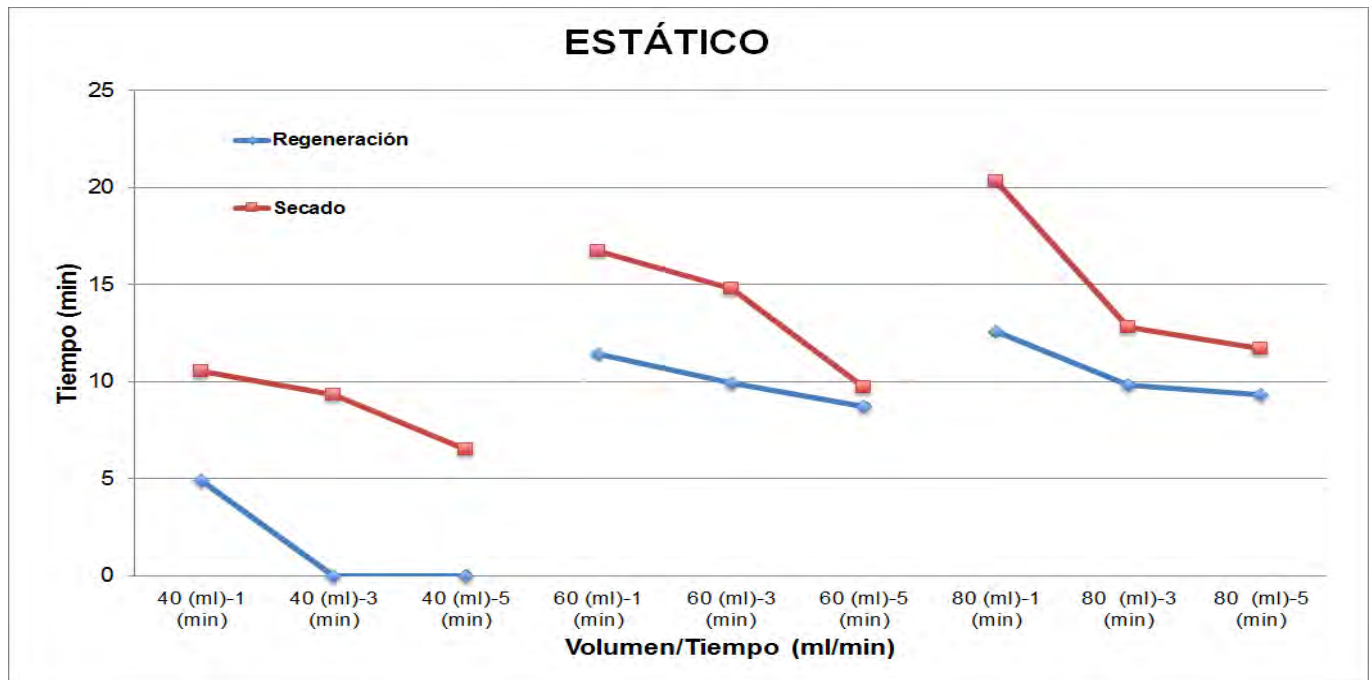


Figura 7.4.3: Tiempos de regeneración y de secado para el caso en el que el distribuidor no tiene giro.

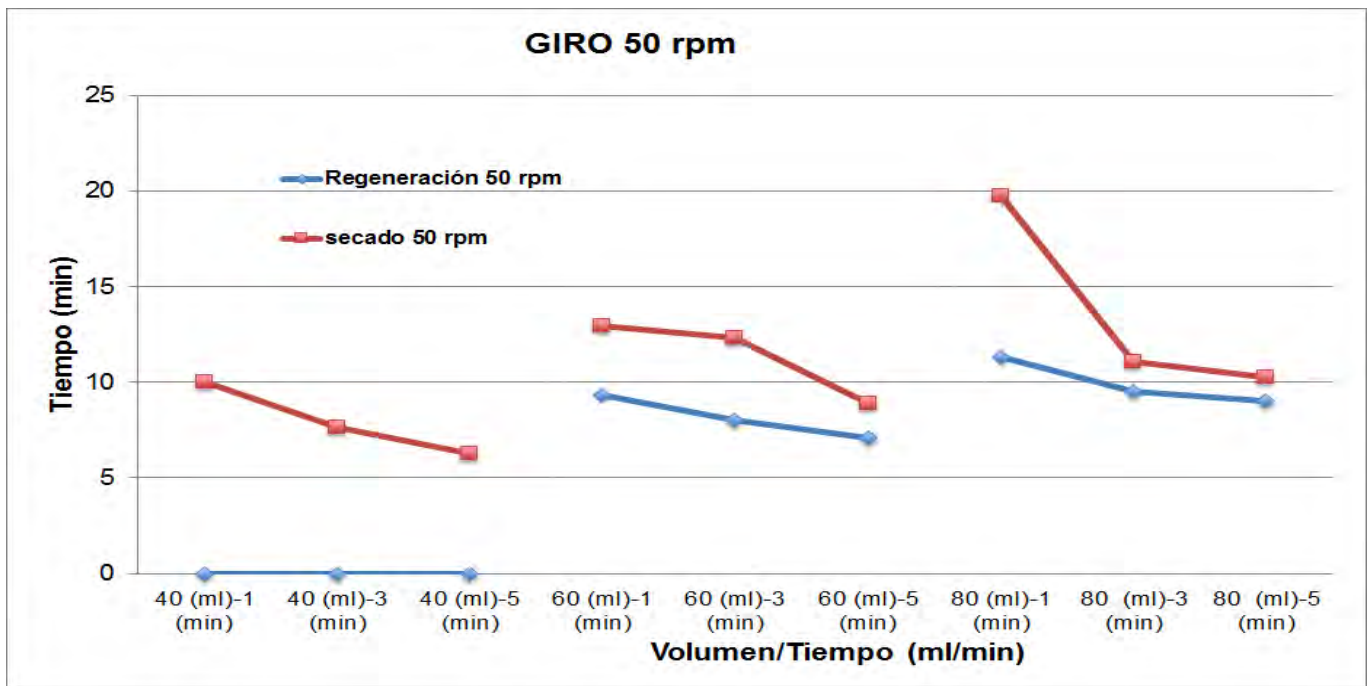


Figura 7.4.4: Tiempos de regeneración y de secado para el caso en el que el distribuidor gira a 50 rev/min.

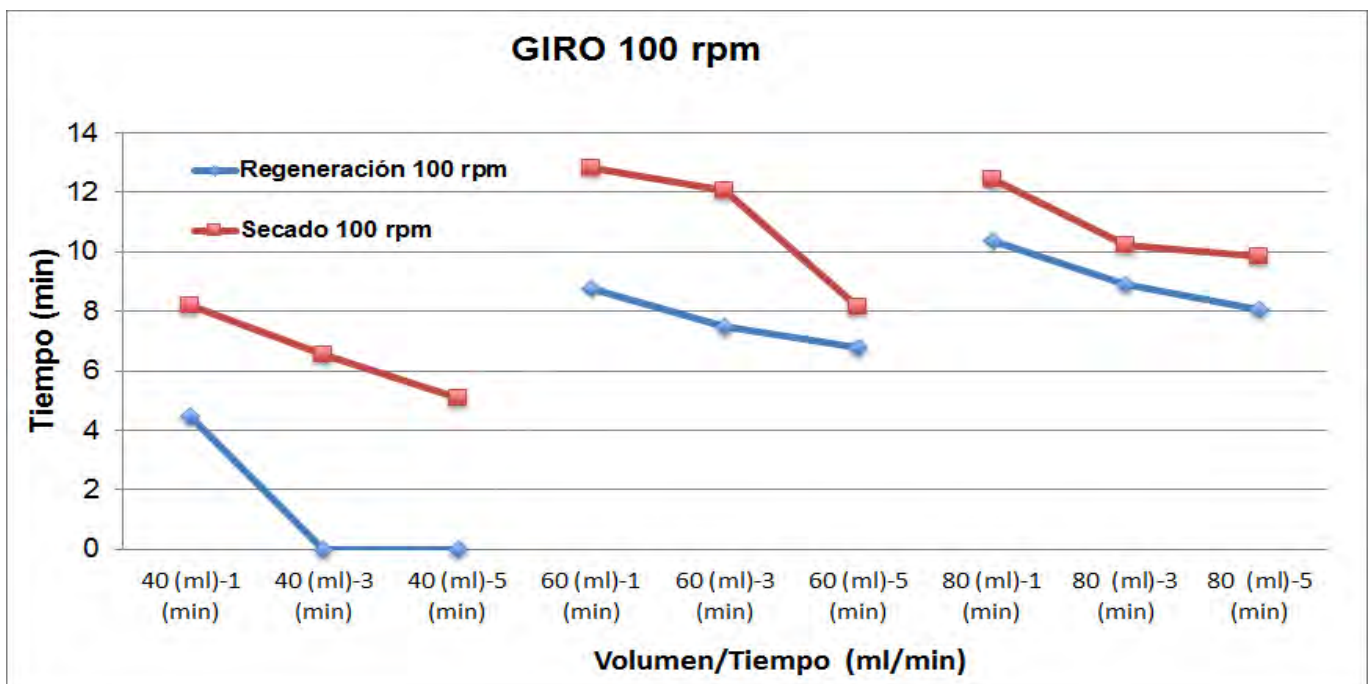


Figura 7.4.5: Tiempos de regeneración y de secado para el caso en el que el distribuidor gira a 100 rev/min.

Se puede apreciar que en las tres figuras las líneas de color rojo y azul tienen más o menos el mismo comportamiento, solo que a medida que el distribuidor gira a mayor velocidad los tiempos de regeneración y de secado van siendo mas cortos, hasta el punto que se puede afirmar que el giro de 100 rev/min mejora la fluidización del lecho en un 20 a 30 %.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

- A mayores volúmenes de agua inyectados y tiempos de inyección rápidos, mayor será la cohesividad que haya entre las partículas, por lo que será mayor el tamaño de los aglomerados que se formen y por tanto será mayor el tiempo que requiera el lecho para regenerarse.
- Mediante el análisis de las fluctuaciones de presión es factible determinar y predecir en general cuál es el comportamiento de un lecho fluido.
- La rotación del distribuidor de aire mejora la fluidización del lecho, tras la inyección del agua, tanto así que las zonas donde se forman los aglomerados se pueden mover y posteriormente romperse dichos aglomerados durante el proceso de secado.
- Es factible reproducir experimentalmente la formación de aglomerados mediante la inyección de agua, ya que los resultados obtenidos son muy similares a los que se obtienen en un lecho en el que se quema combustible.
- El giro del distribuidor a 100 rev/min mejora el tiempo de secado de las partículas de arena en un 30 %, por lo que la fluidización del lecho es más eficiente.
- Mediante el análisis de las señales de humedad relativa y temperatura se puede monitorizar el comportamiento de un lecho, con la misma precisión que si se aplica el método de las fluctuaciones de presión.
- La aceleración centrífuga impartida por la rotación del distribuidor provoca la disminución del radio inicial de las burbujas, por lo que se consigue una distribución homogénea de las burbujas en la superficie del lecho, promoviendo un mejor mezclado de partículas y por tanto una velocidad mínima de fluidización menor.



BIBLIOGRAFÍA

- Daizo Kunii, Octave Levenspiel, FLUIDIZATION ENGINEERING, Second Edition. Butterworth-Heinemann (1991).
- D. Geldart, TYPES OF GAS FLUIDIZATION, Powder Technology, 7 (1973) 285-292.
- J.Gómez Hernández, FLUIDIZED BED WITH A ROTATING DISTRIBUTOR OPERATED UNDER DEFLUIDIZATION CONDITIONS, Chemical Engineering Journal, (2012).
- Ruud van Ommen, S. Sasic, J. Van der Schaaf, S. Gheorghiu, F. Johnsson, M.-O. Coppens, TIME.SERIES ANALYSIS OF PRESSURE FLUCTUATIONS IN GAS-SOLID FLUIDIZED BEDS- a review, International Journal of Multiphase Flow 37 (2011) 403- 428.
- M. Puncochar, J. Drahos, J. Cermak, K. Selucky, EVALUATION OF MINIMUM FLUIDIZING VELOCITY IN GAS FLUIDIZED BED FROM PRESSURE FLUCTUATIONS, Chemical Engineering Communications, 35 (1985) 81-87.
- Derek Wilkinson. DETERMINATION OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY BY PRESSURE FLUCTUATION MEASUREMENT. The Canadian Journal of Chemical Engineering (1995).
- J.F. Davidson, D. Harrison, FLUIDISED PARTICLES. Cambridge University Press (1963).
- C. Sobrino, A. Acosta-Iborra, D. Santana, M. De Vega, BUBBLE CHARACTERISTICS IN A FLUIDIZED BED WITH A ROTATING DISTRIBUTOR, International Journal of Multiphase Flow (2009).

PAGINAS WEB

- www.micropump.com
- www.thermoscientific.com
- www.spain.ni.com
- www.kistler.com
- www.epluse.com

